



Balance de cargas a nivel de distribución secundaria con aplicación a Smart Grid.

Jorge Alberto Arias Puertas

Universidad de Norte
División de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Barranquilla, Colombia
2016

Balance de cargas a nivel de distribución secundaria con aplicación a Smart Grid.

Jorge Alberto Arias Puertas

Trabajo de investigación presentado para optar al título de:

Magister en Ingeniería Eléctrica

Directora:

Mst., Ph.D., María Gabriela Calle

Línea de Investigación:

Redes de Distribución

Grupo de investigación:

Telecomunicaciones y señales

Universidad de Norte

División de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Barranquilla, Colombia

2016

(Dedicatoria)

A mis padres y hermanos.

*A Lina. Para quien espero ser siempre un
ejemplo de vida.*

Resumen

Una de las causas que disminuyen la eficiencia en circuitos corresponde al desbalance de cargas. Las pérdidas técnicas en transformadores y redes de distribución están relacionadas con la intensidad de corriente circulante, no de forma lineal sino cuadrática. Los circuitos desbalanceados presentan niveles superiores de pérdidas por conducción en las fases con cargas mayores y por el incremento de corriente en el conductor de neutro. Es por esta razón que balancear de manera adecuada las cantidades de energía que circulan a través de las fases de un sistema de distribución disminuye este valor.

En este trabajo se utilizan técnicas de optimización y algoritmos de programación lineal entera para balancear cargas monofásicas de un alimentador, un nodo o un transformador de distribución, teniendo en cuenta el histórico de consumo de energía en varios periodos de tiempo, es decir, hábitos de consumo. Los resultados muestran que el método de Branch and Bound aplicado al algoritmo de balance de energía permite disminuir el factor de pérdidas sobre diferentes perfiles de carga en diferentes instantes de tiempo. Durante el proyecto también se probaron algoritmos como Fuerza Bruta, Secuenciación de trabajos en máquinas y Knapsack, los cuales permiten realizar balances de energía en un solo instante de tiempo.

Palabras clave: (Redes de distribución, Eficiencia energética, Balance de cargas, Reducción de pérdidas técnicas).

Abstract

Unbalanced loads are one of the causes for efficiency reduction in circuits. Technical losses in transformers and distribution networks are related to the square of intensity of the circulating current. Unbalanced circuits have higher levels of conduction losses in phases with the greatest burdens and increasing current in the neutral conductor. Therefore, properly balancing the amount of energy flowing through the phases of a distribution system decreases losses.

This work uses optimization techniques and Integer Linear Programming (ILP) algorithms to balance single phase loads in a feeder, a node or a distribution transformer. The thesis employs history of energy consumption over various periods of time, that is, consumption habits. Results show that the Branch and Bound method applied to energy balance can decrease the loss factor over different load profiles in different times. During the project, other algorithms such as Brute Force, Job-Shop Scheduling and Knapsack were also tested. These algorithms allow energy balances in a single instant of time.

Keywords: Distribution networks , energy efficiency , balance loads , reduce technical losses).

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras.....	XI
Lista de tablas	13
1. Introducción	14
1.1 Antecedentes.....	14
1.2 Justificación	15
1.3 Planteamiento del problema	17
1.4 Objetivos.....	18
1.4.1 Objetivo general.....	18
1.4.2 Objetivos específicos	18
1.5 Alcances	18
1.6 Limitaciones.....	19
2. Marco Teórico	19
2.1 Pérdidas de energía en transformadores y redes de distribución	19
2.2 Infraestructura de Medición Avanzada (AMI) y Lectura Automática de Medidores (AMR)	22
2.2.1 Tecnologías Inalámbricas	23
2.3 Balance de cargas	23
2.4 Técnicas de Optimización.....	25
2.5 Métodos matemáticos aplicados	25
2.5.1 Fuerza Bruta	26
2.5.2 Secuenciación de trabajos en máquinas en paralelo	26
2.5.3 Knapsack	26
2.5.4 Simplex	27
2.5.5 Branch and Bound	27
2.6 Trabajos relacionados	28
2.6.1 Pérdidas de energía	28
2.6.2 Balance de energía activa	31
3. Algoritmos y metodología de solución	38
3.1 Modelo matemático base.....	41
3.2 Desarrollo para modelo base.....	42

3.2.1	Fuerza bruta.....	43
3.2.2	Secuenciación de trabajos en máquinas	45
3.2.3	Knapsack 0,1	47
3.3	Planteamiento de propuesta alternativa	50
3.4	Modelo matemático con series de tiempo	51
3.5	Desarrollo para el modelo con series de tiempo	53
3.5.1	Método simplex.....	54
3.5.2	Branch & Bound (Ramificación y Acotación)	54
3.5.3	Estrategia de ramificación	56
3.5.4	Estrategia de acotación	56
3.5.5	Estructura de datos.....	57
4.	Descripción de la implementación de balance con Branch and Bound ..	58
4.1	Ejecución del algoritmo y cálculos de balance	60
4.2	Factor de comparación: Factor de pérdidas	61
5.	Sistema de comunicaciones	64
6.	Pruebas y resultados	65
6.1	Simulación algoritmos iniciales.....	65
6.2	Simulación algoritmo con series de tiempo	67
6.3	Pruebas de laboratorio	68
6.3.1	Comunicación inalámbrica del medidor WiFi (802.11)	68
6.3.2	Balance de cargas en laboratorio	70
7.	Conclusiones y Recomendaciones	72
A.	Anexo: Descripción del software desarrollado para Balance con Branch & Bound.	75
B.	Anexo: Definición variables para algoritmo B&B.....	81
C.	Anexo: Datos y resultados de simulación, 10 cargas, 72 periodos de tiempo. Balance de cargas B&B.	83
D.	Anexo: Datos y resultados de Diseño de experimentos	88
E.	Anexo: Datos y resultados de pruebas de laboratorio	93
	Bibliografía.....	100

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1: Esquema conexión de cargas en un nodo de distribución. Se buscan interruptores que se conectan a la fase analizada.....	39
Figura 2: Ejemplo de balance de cargas con algoritmo de Fuerza Bruta. 12 cargas.....	44
Figura 3: Ejemplo de balance de cargas con algoritmo de Secuenciación de Trabajos en Máquinas. 28 cargas.	47
Figura 4: Base para procedimiento de programación dinámica en el algoritmo de la Mochila.	48
Figura 5: Ejemplo de balance de cargas con algoritmo de Mochila 0-1 para 28 cargas.....	49
Figura 6: Ejemplo árbol de decisión completo para 3 variables.....	55
Figura 7: Ejemplo de demandas de cargas monofásicas a balancear. Tomadas de [13].	59
Figura 8: Esquema de aplicación del algoritmo B&B al balance de cargas.	60
Figura 9: Ejemplo de datos de cargas (a) antes y (b) después de aplicar el algoritmo implementado.....	63
Figura 10: Módulos inalámbricos de comunicación para el medidor Shark 100 (a) externo e (b) interno.....	69
Figura 11: Conexión de medidor con módulo WiFi interno incorporado a una red.	69
Figura 12: Medidores utilizados en las pruebas eléctricas de laboratorio.	70
Figura 13: Bancos de resistencias variables.....	71
Figura A 14: Presentación inicial de la aplicación.....	75

Figura A 15: Formato de fuente de datos para la aplicación. Origen libro de Excel 97-2003 ®.....	76
Figura A 16: Ejemplo de presentación de la información inicial cargada desde el origen de datos.	77
Figura A 17: Ejemplo de árbol de decisión generado por la aplicación Branch and Bound.....	77
Figura A 18: Ejemplo de árbol de decisión generado por la aplicación Branch and Bound.....	78
Figura A 19: Ejemplo de respuesta con matriz de conexiones balanceada.	78
Figura A 20: Ejemplo de respuesta del balance de cargas. Curvas de demanda inicial y balanceada.....	79
Figura A 21: Matriz inicial de conexiones y factor de pérdidas calculado para el caso base.....	79
Figura A 22: Matriz final de conexiones y factores de pérdidas calculados para el caso base con diferentes balanceos de carga. Se elige como mejor $f_{dp}=6,45\%$. 80	
Figura C 23: Matrices de conexión inicial y final para el caso base. Presentación en la aplicación.	85
Figuras E 24: Matriz de conexión inicial, cuadro de demandas y curvas de demanda para el caso de laboratorio – 9 cargas.....	95
Figuras E 25: Matriz de conexión inicial, cuadro de demandas y curvas de demanda para el caso de laboratorio – 9 cargas.....	97
Figura E 26: Resultados de mediciones de corrientes con el equipo Fluke 435 para el caso de laboratorio – 9 cargas.....	99

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1: Ejemplo de matriz de conexiones de cargas a un nodo trifásico de distribución. “1” indica conexión a la fase, “0” indica no conexión.	39
Tabla 6-1: Resultados de prueba de algoritmos iniciales.	66
Tabla 6-2: Resultados de prueba de algoritmo final Branch and Bound.....	68
Tabla C-1: Datos base para la aplicación.	84
Tabla C-2: Datos de simulación de cargas para el caso base, antes y después del balance de cargas.	87
Tablas D-3: Diseño de experimentos para 10, 14 y 18 cargas.....	92
Tabla E-4: Asignación de taps de resistencias variables para el caso de laboratorio – 9 cargas.	93
Tabla E-5: Datos de mediciones con el equipo Fluke 435 para el caso de laboratorio – 98	
Tabla E-6: Datos de comparación de mediciones teóricas y de laboratorio para el caso de 9 cargas.	98

1.Introducción

La disponibilidad decreciente de recursos energéticos para producción de electricidad hace que la necesidad de ahorro sea cada vez más significativa. Cualquier metodología o herramienta que aporte en este sentido es importante en el presente y lo será aún más en el futuro.

Mediante el uso de técnicas de optimización y algoritmos de programación lineal entera se desarrolla y se presenta una solución rápida y eficiente para balancear cargas de un alimentador, un nodo o un transformador de distribución. La aplicación de los resultados se puede realizar de forma manual por personal del operador de la red de distribución.

También es posible su aplicación en instalaciones industriales y comerciales, en las que se conozca el comportamiento de los circuitos.

1.1 Antecedentes

La prestación del servicio eléctrico se segmenta en las actividades de Generación, Transmisión, Distribución y Comercialización. La Distribución de energía corresponde a la entrega del servicio a los usuarios finales, a niveles de tensión requeridos por los mismos [1].

En el segmento de Generación se pueden realizar mediciones de la cantidad de energía entregada al sistema. En Transmisión y Distribución de igual forma se puede realizar esta actividad apoyada en los Centros de Control, instalación de PMUs (Phasor Measurement Unit, Sincrofasores) y los sistemas SCADA/EMS (Supervisory control and data acquisition / Energy Management System) [1].

La recopilación de información de variables eléctricas en tiempo real de las redes de distribución de baja tensión en Colombia no se realiza. Esto genera incertidumbre sobre:

- La calidad de la energía que se suministra a los clientes durante los periodos de consumo.
- Las pérdidas técnicas y no técnicas del circuito.
- El uso eficiente o no del recurso por parte de las empresas de energía [2].

En la realidad, los sistemas eléctricos son dinámicos. No obstante, se planifican, construyen, operan y mantienen como si fueran sistemas estáticos. Esto debido a que no se cuenta con sistemas de monitoreo, análisis y control en tiempo real para redes de distribución secundaria. En su lugar, se utiliza información teórica de condiciones de funcionamiento normal y de contingencia [2].

En el caso de las redes de distribución, los factores más importantes para cada circuito son: número y tipo de usuarios, consumo de energía, longitud de las redes y área de prestación del servicio. Por lo tanto, es normal que se pueda entregar la misma cantidad de energía con niveles de eficiencia diferentes [2].

Adicionalmente, la mayor concentración de usuarios se presenta en el segmento de Distribución. De esta forma, realizar la medición y el balance de cargas en dicha actividad se vuelve un problema más complejo que la situación a nivel de Transmisión y Generación.

1.2 Justificación

En redes de distribución, las pérdidas para los cables y en el cobre para transformadores son función de los valores cuadráticos de las corrientes circulantes, y de los valores de las resistencias propias.

Reducir los valores de corriente, reducirá los valores de las pérdidas. Es en este sentido, que el balance de cargas se convierte en una herramienta valiosa.

Adicional a la disponibilidad de energía, se puede incrementar también la vida útil de los elementos de red y optimizar las inversiones en rediseño y reemplazo de redes. El balance de cargas disminuye también las caídas de tensión por regulación, lo cual impacta en la calidad de la energía entregada al usuario final.

Utilizar las tecnologías de comunicaciones para automatizar la adquisición de datos de medidores de energía contribuirá a mejorar de manera significativa la calidad de la información de la red eléctrica. Dicha información es un insumo básico para tareas de diseño de redes, reconfiguraciones de circuitos, balances de cargas y futura gestión de la demanda.

Adicionalmente, tener esta información impactará la calidad del suministro de energía a los usuarios. Esto se debe a dos factores: El primero es el conocimiento del usuario de las condiciones en las que recibe el servicio. El segundo factor corresponde a las acciones de las empresas de energía para ajustar los parámetros eléctricos a los requeridos por los usuarios.

La implementación del sistema representará un avance en el monitoreo de las pérdidas de energía en baja tensión, ya que en la actualidad se realiza de manera manual para cada circuito de distribución. El análisis de perfiles horarios de carga permitirá detectar anomalías en el circuito, realizando balances en periodos limitados de tiempo y de manera constante. En resumen, automatizar esta tarea, brindará múltiples ventajas sobre los procedimientos actuales para tomar acciones tendientes a disminuir pérdidas de energía.

Es cada vez más necesario un mejor seguimiento, análisis y control de los sistemas de distribución. También se considera muy importante el análisis

continuo para lograr niveles aceptables de eficiencia operativa y calidad del servicio [2].

La asignación de cargas a las fases de un sistema de Distribución se realiza de manera arbitraria, asignando en cada nodo, en el mejor de los casos, una cantidad similar de cargas, sin tener conocimiento de sus consumos. El uso de herramientas matemáticas ayuda a tomar esta decisión de una manera técnica.

1.3 Planteamiento del problema

El análisis de la distribución de forma continua no es posible en Colombia. En otros países, lo más cercano es la gestión automática de cortes basada en un circuito eléctrico detallado con sus entradas desde SCADA y AMR (Automated Meter Reading) [2].

En Colombia, los balances de energía a nivel de distribución se realizan de manera tradicional con el procedimiento de macromedición. Un operario toma la lectura a un medidor instalado en las salidas de baja tensión de un transformador desenergizado (macromedidor); luego varios operarios leen los medidores individuales de los usuarios del circuito, en dos instantes de un periodo predeterminado por la empresa de energía, normalmente 7 días. Con este balance energético se mide la energía entregada y la realmente facturada, estimando el nivel de pérdidas para el circuito analizado. Este procedimiento incluye en el resultado las pérdidas técnicas y no técnicas [3].

De acuerdo con la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), las pérdidas de Distribución en el año 2012 corresponden al 13,1% de la demanda total de la energía del país [4]. Por esto, es importante realizar esfuerzos que conduzcan al análisis, estudio y generación de políticas para reducirlas.

El primer problema que debe resolverse es la falta de información de calidad y de manera continua, de los circuitos de distribución en Colombia.

Un segundo problema corresponde a los balances, tanto de cargas como de energía, a nivel de circuitos de distribución. El balance de energía permite detectar pérdidas, mientras que el de cargas influye en la calidad del servicio y el uso eficiente del recurso.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Implementar algoritmos de balanceo de energía y de cargas para redes de distribución secundaria.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar desbalance de cargas y de energía en un circuito de distribución y proponer soluciones, de acuerdo con algoritmos presentes en la literatura.
- Evaluar el desempeño de los algoritmos propuestos, tanto en simulación como en hardware.
- Determinar un sistema de comunicaciones adecuado para la red de distribución, considerando las necesidades de una Smart Grid.

1.5 Alcances

- Se considerarán únicamente variables eléctricas de consumo de energía activa y corrientes.

- Se propondrá una solución para el balance de cargas de un nodo, un transformador o alimentador principal.
- Se realizará una implementación física para pruebas en condiciones de laboratorio.
- Se compararán los resultados de la solución propuesta en simulación con los resultados de la implementación.
- Se evaluará si la presencia de sistemas de comunicaciones inalámbricos afectan la calidad de la energía que reciben las cargas en el prototipo.

1.6 Limitaciones

- El sistema propuesto no contempla la generación de acciones automáticas sobre los medidores ni las cargas.

2.Marco Teórico

2.1 Pérdidas de energía en transformadores y redes de distribución

En un sistema, las pérdidas totales de energía corresponden a la diferencia entre la energía neta entregada y la energía registrada por cada uno de los usuarios y/o servicios. En redes de energía se clasifican como **Pérdidas Técnicas** y **Pérdidas No Técnicas** [5].

Las pérdidas técnicas (no deseables) “se deben a las condiciones propias de la conducción y transformación de la energía eléctrica, por tanto dependen del grado de optimización de la estructura del sistema eléctrico, del equipamiento, y de las políticas de operación y mantenimiento” [5].

En los transformadores se identifican básicamente dos tipos de pérdidas, **Pérdidas en el cobre y Pérdidas en el hierro** [5].

Las pérdidas en el cobre se presentan por la resistencia de los cables con los que se construyen los bobinados del transformador. Estas dependen de la demanda de potencia de los usuarios, es decir, depende también de la corriente en cada instante de tiempo. Las pérdidas en el hierro o en vacío están asociadas al material del núcleo, a la forma constructiva y a la tensión de trabajo aplicada. Se consideran prácticamente constantes por la estabilidad de la tensión entregada por los sistemas eléctricos en la actualidad [5].

Para el caso de los sistemas de distribución, la evaluación de las pérdidas es más compleja que para los sistemas de generación, transmisión y subtransmisión, debido a la diversidad en las topologías y la cantidad de componentes. En el caso de redes de distribución, adicional a **transformadores**, se tienen **condensadores, subsistemas primarios, subsistemas secundarios y cargas** [5].

Las líneas aéreas y subterráneas que conforman los subsistemas primarios y secundarios son la ruta por la que circula la corriente necesaria para suplir la demanda de los usuarios y servicios. Las **pérdidas de potencia (P_L)** están asociadas principalmente con la resistencia de los conductores (R) y estas corrientes (I), de acuerdo con la expresión (2-1) [5].

$$P_L = I^2 \cdot R \quad (2-1)$$

Por estar expuestos a tensiones bajas, otras pérdidas como las generadas por efecto corona y por efecto dieléctrico (o aislador) suelen ser mínimas, por lo cual se desprecia su efecto [5].

Un modelo con el que se puede calcular un factor de pérdidas, según [5], se define como la relación de las pérdidas promedio y las pérdidas en el pico de carga. En general, las pérdidas de energía por efecto Joule dependen del cuadrado de la corriente, y esta a su vez depende de la carga.

De acuerdo a [6], el factor de pérdidas (%) se puede calcular con los datos de las demandas con la siguiente relación:

$$f_{dp} = \frac{\sum_{j=1}^n D_j^2 * t_j}{D_{max}^2 * T} \quad (2-2)$$

Donde D_j y t_j son las demandas y las duraciones en tiempo, y D_{max} y T corresponden a la demanda máxima o pico y el tiempo global, aplicada a un período de tiempo, normalmente, diario.

Este factor corresponde al “porcentaje de tiempo requerido por la carga pico para producir las mismas pérdidas que las producidas por las cargas reales sobre un periodo de tiempo especificado” [6].

Dado que la motivación para realizar balances en este proyecto se relaciona directamente con la disminución de pérdidas, se utilizará este cálculo de f_{dp} como métrica para establecer las mejoras en los sistemas secundarios de prueba con los algoritmos de balanceo aplicados.

Como resumen de esta sección, se recalca la dependencia de las pérdidas en las redes y en el cobre de los transformadores de distribución, de los valores cuadráticos de la carga o de la corriente.

2.2 Infraestructura de Medición Avanzada (AMI) y Lectura Automática de Medidores (AMR)

“Las redes inteligentes (SG) involucran un componente tecnológico con gran cantidad de equipos electrónicos, los cuales podrían ser fabricados o integrados en el país. La ingeniería local tiene experiencia (o puede adquirirla) en las componentes de sistemas asociadas a los procesos de recolección de datos, procesamiento de información e integración de aplicaciones” [1].

SG Está a su vez compuesta por dos tipos de redes, una eléctrica y una de telecomunicaciones. Se caracteriza por un alto flujo de datos de electricidad y de control para crear una amplia y automatizada red eléctrica distribuida [7].

AMI será un componente vital en Smart Grid, al proporcionar valiosa información, soportada en los Smart Meters. AMI Se considera una evolución de AMR (Automatic Meter Reading). Permite recopilar datos de variables eléctricas y perfiles de consumo energético, no solo con fines de facturación. Soporta el monitoreo en tiempo real y la realización de operaciones de desconexión, restauración y gestión automática de la demanda (Automated Demand Response, ADR) [8].

Un medidor inteligente en una AMI, puede enviar información a los colectores autorizados para facilitar el monitoreo y control del consumo por parte de las empresas de energía [7].

Sistemas AMR basados en WiFi juegan también un rol importante en las futuras SG. Estarán conformados por cuatro capas, entre medidores internos, medidores de usuarios y concentrador, concentradores y concentrador principal, y entre este y central remota de la empresa de energía [7].

2.2.1 Tecnologías Inalámbricas

“La red eléctrica tradicional es un sistema rígido, que carece de flexibilidad en los procesos de generación, transmisión y distribución de energía”. La tendencia y siguiente generación de las redes eléctricas está enmarcada en el concepto de Smart Grid (SG). Está a su vez compuesta por dos tipos de redes, una eléctrica y una de telecomunicaciones. Se caracteriza por un alto flujo de datos de electricidad y de control para crear una amplia y automatizada red eléctrica distribuida [7].

La red de comunicaciones en SG se segmenta de acuerdo a su zona de cobertura en: HAN (Home Area Network), NAN (Neighborhood Area Network), MAN (Metropolitan Area Network) y WAN (Wide Area Network), cada uno de los cuales tiene sus propios requerimientos especiales de medios, protocolos y seguridad de la información (como autenticación, confidencialidad, integridad) [7].

Diferentes tecnologías de comunicación se han propuesto para Smart Grid, usando medios de transmisión cableados o inalámbricos o mixtos. En el caso de medio de transmisión inalámbrico se tienen opciones como Bluetooth (IEEE802.15.1), WiFi (IEEE 802.11n), ZigBee (IEEE802.15.4) y Zwave [7].

2.3 Balance de cargas

La circulación de corrientes o potencias diferentes por cada una de las fases de un circuito provocan pérdidas adicionales y a su vez producen desbalances en tensiones, por pérdidas o regulación de voltaje debido a las impedancias de los conductores de la línea. Esto se genera por la diversidad en las cargas conectadas y los hábitos de consumo de los usuarios del servicio [9] [10].

El suministro de energía en sistemas de distribución se realiza de manera común mediante circuitos trifásicos de cuatro hilos. La potencia activa (P) que absorbe una carga trifásica se expresa como [10]:

$$P = V_A I_A \cos \varphi_A + V_B I_B \cos \varphi_B + V_C I_C \cos \varphi_C \quad (2-3)$$

Donde I y V corresponden a los valores eficaces de las corrientes de línea y voltajes, y los cosenos de los ángulos corresponden al factor de potencia para cada una de las fases (A,B,C) del sistema. La expresión es válida también para cargas monofásicas conectadas a sistemas trifásicos, en la que cada uno de los factores corresponde a la potencia entregada por cada fase a las cargas [10].

Ahora bien, las pérdidas de potencia por conducción (P_L), en las fases y el neutro corresponde a [10]:

$$P_L = I_A^2 R_A + I_B^2 R_B + I_C^2 R_C + I_N^2 R_N \quad (2-4)$$

En (2-4), R_A , R_B , R_C y R_N , corresponden a las resistencias e I_A , I_B , I_C , I_N a las corrientes de los conductores de las fases y del neutro en la red de distribución respectivamente.

En redes de distribución, las protecciones, calibres de cables, interruptores y demás elementos de red, se calculan con demandas máximas y demandas diversificadas, así como las pérdidas, regulación o caída de voltaje y tiempo o vida útil del proyecto (redes y transformadores).

Los métodos más utilizados en análisis de redes y pérdidas suponen que los circuitos que se estudian se encuentran balanceados [9]. En la mayoría de los estudios se evidencia esta consideración. Sin embargo, los sistemas reales de distribución no suelen estar balanceados.

2.4 Técnicas de Optimización

Optimizar consiste en elegir una mejor alternativa, en algún sentido, entre las demás posibles. Las técnicas propias de la Investigación Operativa se recogen bajo el término de optimización o programación matemática, cuyos modelos incluyen tres componentes fundamentales [11]:

- **Función Objetivo:** Medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar.
- **Variables de decisión:** Elecciones que se pueden tomar y que afectan el valor de la función objetivo.
- **Restricciones:** Conjunto de relaciones que algunas o todas las variables están obligadas a satisfacer. Los coeficientes de costo son los que complementan a las variables en estas restricciones.

El abordar un problema de este tipo supone dos etapas: La determinación de un modelo matemático que lo rige y el uso de técnicas matemáticas para su solución [12].

2.5 Métodos matemáticos aplicados

Se requiere la mejor combinación de las variables binarias que indican conexión a las fases, con respecto al balance de potencias activas o cargas, es decir, la mejor matriz de conexiones. En esta matriz binaria, los ceros indican no conexión de la carga a la fase respectiva, como en [13].

A continuación, se presentan diferentes métodos para resolver los modelos matemáticos planteados:

2.5.1 Fuerza Bruta

En el enfoque de **Fuerza Bruta** se realiza una lista completa de todas las soluciones factibles y se calcula su costo o valor de función objetivo. Al finalizar el cálculo se elige la mejor solución. La complejidad aumenta de manera exponencial con la cantidad de variables. [14].

2.5.2 Secuenciación de trabajos en máquinas en paralelo

En un problema de secuenciación se deben realizar n tareas a través de m máquinas. Su resolución depende básicamente de dos aspectos: La secuencia requerida de las tareas y el criterio de optimización a utilizar [15].

Algunas reglas heurísticas de secuenciación son: Shortest Processing Time (SPT), Largest Processing Time (LPT), Critical Ratio (CR) [15].

Estos problemas pueden ser: Estáticos, donde todos los n productos están listos para ser procesados; Dinámicos, en los que los productos llegan de forma probabilística a la línea; de Secuencia fija, con m , n y orden fijos, como en una línea de ensamblaje; y de Secuencia variable [15].

2.5.3 Knapsack

Dado un contenedor o mochila de capacidad W , y un conjunto S de n objetos con peso w_i y beneficio b_i cada uno, se requiere seleccionar la mejor combinación de elementos que garanticen un beneficio máximo sin exceder la capacidad de la mochila [16], es decir, llenar la mochila con el mayor beneficio [17].

La búsqueda de la mejor ganancia se realiza en función de elementos para mochilas de menor capacidad, definiendo una función recursiva y una comparación, a medida que se agrega un elemento. Se almacenan resultados

parciales para evitar repetición de cálculos cuando se requieran en un nuevo subproblema y también se almacenan las mejores soluciones. Se utilizan ecuaciones de recurrencia hacia adelante y hacia atrás, empleando una relación recursiva que resuelve una instancia actual del problema con base en una instancia anterior (dinámica) [17].

Si los pesos o la capacidad son reales, esta solución no se puede aplicar [17].

2.5.4 Simplex

Con este algoritmo se resuelven problemas de programación lineal de m restricciones y n variables. Este modelo fue creado en 1947 por George Bernard Dantzig (Estados Unidos) y Leonid Vitalievich Kantorovich (Rusia). Se desarrolla a través criterios internos de entrada de variables a la base y salida de variables de la base, es decir, intercambio de variables, una en cada iteración [12].

Es un procedimiento iterativo que permite mejorar la solución de la función objetivo en cada paso [18].

Se parte de una solución básica factible (fase I), y posteriormente se busca una mejor (fase II). La forma de *Tableau* es la más cómoda para representar un problema de programación lineal para la aplicación del método Simplex [19].

Se debe tener en cuenta que para este algoritmo hay varios tipos de solución, única, múltiple, indeterminada, y también puede ser infactible o sin solución [12].

2.5.5 Branch and Bound

Fue implementado por Land & Doig en 1960. Se aplica a problemas de optimización con restricciones y a problemas de decisión [12].

El espacio de las soluciones al problema planteado se suele interpretar como un árbol, en el que cada rama conduce a una nueva solución (Ramificación) identificada como un nodo. Con este algoritmo se deben eliminar del análisis soluciones que no mejoren las óptimas halladas, reduciendo la cantidad de cálculos a realizar y los recursos necesarios (Acotación), es decir, no se genera el espacio completo de soluciones por la poda de ramas y todos sus nodos descendientes [12].

2.6 Trabajos relacionados

Se encuentran diferentes estudios de las formas de analizar el problema de pérdidas de energía en sistemas eléctricos y propuestas para solucionarlo.

Los operadores de red (OR) al llevar dichas soluciones a la práctica, realizan básicamente actividades como cambio de conductores en circuitos, reemplazo de acometidas de transformadores y usuarios, y reemplazo de medidores. Los cálculos para la elección de los conductores en media y baja tensión (MT y BT) se realizan de manera tradicional, asumiendo cargas iguales para cada cable o fase, es decir, balanceadas [10]. El objetivo básico de sus prácticas es disminuir pérdidas por fraude.

2.6.1 Pérdidas de energía

En un sistema, las pérdidas totales de energía corresponden a la diferencia entre la energía neta entregada y la energía registrada por cada uno de los usuarios y/o servicios [5].

Las pérdidas de energía por el efecto Joule son irreversibles y se manifiestan en forma de calor cuando circula corriente eléctrica en un material conductor, incrementando su temperatura. La ecuación (2-5) muestra que las pérdidas por

efecto Joule (E_Q) dependen de la resistencia del conductor (R), del cuadrado de la intensidad de la corriente (I) circulante y del tiempo (t) [5].

$$E_Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (2-5)$$

El valor mínimo de pérdidas de potencia activa (en el cobre o conductores) se presenta en circuitos balanceados, es por lo tanto deseable obtener esta condición o una próxima a ésta. En [10] se observa la demostración de lo anterior, obteniendo este mínimo cuando las corrientes de línea son iguales ($I_A = I_B = I_C$) y la corriente por el neutro cero ($I_N = 0$). Por lo anterior, la corriente circulante por el neutro es también un indicador de pérdidas de energía en el circuito trifásico.

En [10] se demuestra una mayor eficiencia en pérdidas al suministrar una misma cantidad de energía a una carga trifásica balanceada que a cargas bifásicas o monofásicas.

Lo anterior se presenta por los incrementos en valores de corrientes respectivos.

$$P_{L2\phi} = 2 P_{L3\phi} \quad (2-6)$$

$$P_{L1\phi} = 6 P_{L3\phi} \quad (2-7)$$

Un receptor bifásico, que absorba la misma potencia total planteada, generará pérdidas en la línea equivalentes al doble ($P_{L2\phi}$) y uno monofásico unas equivalentes a seis veces ($P_{L1\phi}$) comparadas con el suministro trifásico balanceado ($P_{L3\phi}$).

En el caso de instalaciones internas, las metodologías de balance pasivo esperan lograr un desbalance menor al 5%. La distribución se asigna mediante un cuadro de cargas que se realiza desde la etapa de diseño y se ejecuta o conexas en la construcción inicial de los circuitos, usando el criterio de consumos nominales de

los equipos instalados o a instalar [9]. En la práctica se intenta balancear cargas en instalaciones internas con un criterio inicial, de acuerdo a un censo de carga instalada y factor de utilización, sin considerar hábitos de consumo de cada usuario en el circuito específico.

El mismo criterio se aplica en redes de distribución de baja y media tensión, en los que se considera que un circuito está desbalanceado cuando la diferencia entre la fase más cargada y la menos cargada es mayor al 15% [9].

Pese a lo anterior, no suele tenerse en cuenta el balance de carga como una costumbre técnica para mejorar las pérdidas por regulación, ni en circuitos internos ni en redes de distribución de operadores comerciales [10].

En las metodologías y estudios que se implementan para la reducción de pérdidas en sistemas eléctricos juegan un papel importante y corresponden a las prácticas más comunes las siguientes:

- La reconductorización o cambio de calibres de conductores.
- El reemplazo de acometidas y medidores.

Como complemento de lo anterior se han realizado múltiples estudios de metodologías adicionales como:

- Reconfiguración de circuitos (manual o automática).
- Balance de cargas.
- Gestión de la demanda y desplazamiento de cargas. Soportados en diferenciación de precios, asignación de horarios a cargas especiales y en el uso de medidores y electrodomésticos inteligentes.
- Generación distribuida.
- Bancos de baterías y dispositivos de almacenamiento de energía.

- Fuentes alternativas de generación de energía. Eólica y fotovoltaica.

Estas últimas orientadas en especial a la implementación de Smart Grid, contando con los avances tecnológicos respectivos de recolección y tratamiento de la información y la capacidad de control de la demanda.

En [20] proponen un modelo para resolver el problema de selección y cambio de conductores (CSS – conductor size selection) en sistemas radiales de distribución. Modelan la operación del estado estacionario del sistema mediante ecuaciones lineales. Usan el modelo de programación lineal entera mixta, y lo resuelven mediante software existente de optimización (AMPL y CPLEX). Ofrecen dos formas de resultados, la primera corresponde a un óptimo con costos de pérdidas e inversión de reconductorización, y la segunda en forma de Pareto con dos funciones objetivo, pérdidas de energía y costos de inversión en el que se puede evaluar la mejor opción acorde las políticas del OR. En este estudio asumen como constantes las potencias activa y reactiva durante el cálculo.

2.6.2 Balance de energía activa

En esta tesis se entiende por balance a la asignación o distribución de las cargas o usuarios de energía entre las fases disponibles en un sistema eléctrico, de manera tal que cada fase asuma, en lo posible, una parte equivalente de la energía total suministrada en un punto de conexión.

En [9] realizan un procedimiento de balance, desde los extremos de los circuitos primarios de distribución hacia la subestación, conmutando ramales monofásicos de la fase más cargada a la de menor carga, al igual que los ramales bifásicos y trifásicos, haciendo uso de teoría combinatoria, con una gran cantidad de permutaciones. Consideran que un circuito está desbalanceado si la diferencia de corrientes entre la fase de mayor y menor carga es superior al 15%. El objetivo es

minimizar la diferencia entre las fases de mayor y menor carga, en primer lugar trasladando ramales monofásicos completos, de ser necesario, en segundo lugar, se trasladan ramales bifásicos completos y se realiza intercambio de fases, y en tercer lugar se realiza el intercambio de cargas monofásicas en ramales trifásicos. Con el ejemplo desarrollado se obtiene una mejora en el balance del 283% inicial al 8,1% final.

El modelo propuesto en [21] busca el balance a través de la reconfiguración de las conexiones de las cargas, mediante un enfoque mono objetivo. Realizan las simulaciones con un circuito de distribución de 22 nodos y 79 cargas. La función objetivo a maximizar contiene las variables para voltaje, corriente y pérdidas, con restricciones de caída de tensión, corrientes y pérdidas de energía en cada fase y ruta de la red. Aunque el modelo es típicamente combinatorio y no lineal, la resolución depende únicamente de la determinación del vector variable binario x de conexión, con el que se determinan las demás variables. La solución debe satisfacer criterios adicionales como la caída relativa de tensión (S_1), el desbalance en el transformador (S_2), las pérdidas relativas (S_3) y el número relativo de cambios de fase (S_4). Implementan un algoritmo genético para buscar una respuesta eficiente, para lo cual definen la estructura del cromosoma, evaluación de la aptitud, proceso de selección natural y reproducción y mutación. Para la estructura del cromosoma definen 6 esquemas de cambio de fase para cada consumidor (matriz de conmutación). Optan por una función objetivo que considera el desbalance en el transformador (S_2) como criterio de evaluación de la solución (usualmente $<5\%$). Consideran que la cantidad de interruptores en el circuito es de alrededor del 10% de la cantidad de usuarios, según experiencias de empresas de energía. Obtienen de la simulación una mejora en el desbalance del transformador de 11.7% inicial a un 0.3% final.

En [22] se plantean algoritmos para reconfigurar una red de distribución primaria o de media tensión (MT) radial con 2 subestaciones asociadas, con el objetivo de minimizar pérdidas. Dicha reconfiguración se logra con el accionamiento de

conmutadores trifásicos. Requiere en la práctica de la capacidad de control remoto de manera continua de los conmutadores como parte de la automatización de la distribución. Los cálculos se realizan con flujos de carga con cada grupo de intercambio de ramas para obtener los niveles mínimos de pérdidas y de balance de cargas. Dicho balance se define como la relación entre la potencia aparente (S) en el extremo y la potencia máxima (S_{\max}) en cada rama. Se realizan pruebas en simulación del método implementado con un sistema hipotético de 12,66kV, con 2 subestaciones y 32 nodos. El término de balance de cargas podría entenderse en este caso como un factor de carga.

Este enfoque se ha utilizado en múltiples estudios. Por ejemplo en [23] y [24] estudian en simulaciones, la viabilidad técnica y económica de la respuesta automática de la demanda en hogares (Domestic Demand Response) con electrodomésticos inteligentes. El desplazamiento de carga (Load Shifting) es una forma específica de respuesta de la demanda, donde no se logra reducción neta de la carga sino que se reprograma en el tiempo. Es una medida que se complementa con la imprevisibilidad de fuentes alternativas de energía, como la eólica. Electrodomésticos inteligentes (SEAs- Smart energy appliances) son los que tienen un consumo importante de energía y la flexibilidad para desplazar su consumo sin afectar, o de una manera mínima, el confort del usuario. Un ejemplo son los equipos de lavado, en los cuales el desplazamiento crea suficiente valor y justifica la inversión en servicios inteligentes de control de energía. También aplica para cargas de refrigeración y ventilación. El mayor y más reciente interés de este desplazamiento es la reducción de la potencia pico para evitar sobrecargas en la red eléctrica y en la capacidad de generación.

Según [25], las técnicas de la gestión de la demanda en el lado del usuario (DSM – Demand Side Management) se pueden dividir en dos categorías: Control directo de la carga (DLC) y precios dinámicos. El estudio se centra en las DLC, que permiten a las empresas de energía operar ciertos aparatos interrumpibles

durante ciertos periodos para mantener el balance entre oferta y demanda de energía durante las horas pico. El artículo propone utilizar HEM – (Home Energy Management) para una vivienda individual. Adicionalmente, se cuenta con una arquitectura coordinada de gestión de energía (CoHEM – Coordinated home energy management) para un vecindario, previendo un efecto positivo en la curva de su demanda agregada. El problema de minimización planteado para HEM es resuelto reformulándolo como un Proceso de decisión de Markov (MDP). Para CoHEM, se usa el modelo predictivo de control de certeza equivalente (CEC). El artículo presenta simulaciones exitosas para 50, 170, 210 y 400 hogares. Este enfoque también corresponde a control automático de la demanda, con electrodomésticos con tareas que pueden ser desplazadas en el tiempo.

También basado en la técnica de DLC, en [26] donde se revisa el potencial de proveer servicios de balance de carga intra horaria usando cargas HVAC (Heating, ventilating and air conditioning). El estudio evalúa diferentes perfiles de temperaturas exteriores e internas, según las necesidades del cliente. La solución planteada requiere de las características de comunicación de doble vía de la red Smart Grid. El estudio parte de un modelo inicial correspondiente a una unidad residencial HVAC. Posteriormente, en el algoritmo se generan dos grupos de unidades, las que se encuentran encendidas (on) y las que no (off). En ambos grupos se priorizan los cambios de estado de acuerdo a las temperaturas de las habitaciones. Este estudio también define el balance teórico en función de suavizar la curva de demanda y se realizan modelaciones y cálculos teóricos.

Otro ejemplo se encuentra en [27], en el que mencionan la importancia de la respuesta de la demanda (DR) en Smart Grid. Las redes eléctricas actuales unidas a la comunicación bidireccional entregarán a los consumidores el precio de la energía en tiempo real a través de medidores inteligentes. El estudio determina el mejor momento para la operación de los electrodomésticos inteligentes para balancear la reducción del costo de la energía y los inconvenientes generados por los retrasos razonables en su funcionamiento.

Desarrollan un esquema de programación para electrodomésticos inteligentes como un problema de parada óptima. La variable aleatoria es el precio en tiempo real (RPT), que se actualiza periódicamente (usualmente media o una hora). El modelo para cada electrodoméstico contempla dos costos, el de la propia energía y el debido al tiempo de espera. Minimizan entonces el costo total promedio de la energía de todos los electrodomésticos en el tiempo. Simulan con modelos de tres electrodomésticos, en los que se observa que las lavadoras de platos y secadoras de ropa son ideales para la gestión de la demanda por sus altos consumos, cortos ciclos pesados y alta demanda pico; el refrigerador ofrece menos oportunidades. Obtienen con los algoritmos distribuido o centralizado una dramática reducción del costo promedio (cerca del 35%).

En [28] investigan el problema del balance entre el suministro y la demanda de energía en una red con generación convencional y renovable, y cargas flexibles y con posibilidad de almacenamiento de energía. La intermitencia de las fuentes renovables puede suplirse con generadores de rápida respuesta como los de gas natural. El almacenamiento puede ser usado para desplazar la disponibilidad de energía en el tiempo, y junto a cargas flexibles activan la absorción adaptativa de energía para contrarrestar la variabilidad en generación renovable. Los componentes de la red de energía en el modelo son: Cargas, Generadores renovables y almacenamiento en sitio, Generador convencional y Mercado de energía. Las cargas básicas representan las demandas críticas de energía, que deben ser satisfechas cuando se solicita. Las cargas flexibles representan algunos requerimientos de energía controlables o que se pueden restringir cuando por ejemplo el costo del suministro es alto. El objetivo es minimizar el costo del sistema, que mejora cuando la capacidad de almacenamiento aumenta, disminuyendo la restricción de la capacidad de respuesta de suministro de la generación convencional.

En [29] presentan un marco de referencia para la gestión autónoma del lado de la demanda (DSM – Demand Side Management). Clasifican tres formas de consumo de energía para una eficiente gestión de la demanda, carga básica (baseline load), carga por ráfaga (burst load) o de duración completa y fija, y carga normal (regular load). También clasifican las salidas de las interfaces de los electrodomésticos (Preemption, off, ready, run, idle, complete, fault, entre otras). La principal función de la programación en tiempo de ejecución es controlar la operación de los electrodomésticos con el fin de respetar el límite de capacidad satisfaciendo criterios específicos de aceptación, por ejemplo, el confort. En caso de que la capacidad no sea suficiente, algunas tareas se desplazan. Demuestran a través de simulaciones el impacto positivo del sistema para programar cargas sin superar el límite de capacidad, y si esto no es posible, minimiza el tiempo en el que se sobrepasa este límite.

En [30] mencionan que una alta fluctuación de la demanda de energía entre horas pico y valle puede resultar en una mayor perturbación en el flujo de energía. En este estudio el balance de cargas se entiende como la modificación de los picos y valles de consumo, para garantizar una curva suave de consumo de energía en los lados de la carga y la demanda. Esto se prueba con simulaciones de generación distribuida de energía con baterías, celdas solares y turbinas de viento.

Disminuir la carga pico e incrementar el valor promedio del consumo de energía del sistema de potencia es el objetivo principal en [31]. Para esto, el trabajo programa el funcionamiento de los electrodomésticos y procesos industriales con el fin de desplazar cargas de usuarios residenciales, comerciales e industriales. Se requiere usar los medidores inteligentes y comunicación bidireccional para conmutar cargas. En respuesta el usuario puede recibir incentivos en forma de reducción de precios.

En [13] hacen referencia a la gran cantidad de trabajos que se han realizado para la disminución de pérdidas de energía en niveles de distribución primaria, no así para niveles de red secundaria. El estudio implementa 5 algoritmos de balanceo para redes secundarias en microprocesadores: Método de distribución jerárquica con referencia fija (MDJ-RF), con referencia móvil (MDJ-RM), de distribución ponderada (MDP), de distribución múltiple (MDM) y el algoritmo de distribución dinámica de cargas (ARDC). Para analizar el desempeño de los algoritmos se realiza la simulación para un grupo de 10 casas, y el consumo relativo por cada hora del día, durante 72 horas. Para comparar el desempeño, se consideraron como variables de interés la utilización de memoria y los tiempos de ejecución. Los algoritmos MDP y ARDC muestran los mejores resultados. La respuesta del algoritmo es una matriz de conexión, en la que se presenta la menor cantidad de conmutaciones según el modelo. El conjunto de cargas de este artículo se utilizó dentro de las pruebas de esta tesis, con fines de comparación.

El balance de cargas es uno de los más importantes problemas en calidad de energía [32]. La correcta selección de conexión de las cargas puede reducir significativamente las pérdidas. Resaltan la importancia como indicador de pérdidas la magnitud de la corriente por el neutro en sistemas desbalanceados. Estudios anteriores se han realizado para ciertas condiciones, como en el momento de carga pico, mientras que en la práctica se debe realizar para un intervalo de tiempo en el que la variación de las cargas puede ser sustancial. En el artículo presentan un algoritmo basado en el método leapfrog modificado (MOLFOP) considerando varios intervalos de tiempo, buscando el mejor arreglo de conexión. La función objetivo es expresada en función de las diferencias de mínimos cuadrados de las magnitudes de las corrientes entre las 3 fases. Debido a que el desplazamiento de cargas en cortos periodos de tiempo es prácticamente imposible, se fijan los interruptores durante el periodo considerado, la posición de cada interruptor (tripolar) se mantiene desde la primera hasta la última hora. Obtienen el balance aplicando el algoritmo MOLFOP a los términos

del gradiente, derivando la función objetivo con respecto a la variable asignada a cada uno de los interruptores (sw_{k1} , sw_{k2} , sw_{k3}). Definen un factor de desbalance β (raíz del cociente de la resta entre corrientes máxima y mínima de fase, y su suma) para evaluar el desempeño del modelo. Menciona que la simulación realizada con una red de prueba de 10 cargas y 24 horas reduce las pérdidas y obtiene un balance adecuado.

En resumen, se han desarrollado diferentes técnicas para mejorar balances y reducir pérdidas en sistemas eléctricos, como: Reconfiguración de circuitos (manual o automática), gestión de demanda con diferenciación horaria de precios de la energía, gestión de la demanda con desplazamiento de cargas con medidores y electrodomésticos inteligentes, balanceo de cargas, generación distribuida. La solución propuesta en este trabajo no utiliza estos métodos, sino que establece una alternativa de conexión de usuarios, de tal manera que se mejore el balance de energía en circuitos secundarios.

3.Algoritmos y metodología de solución

En un nodo de distribución, el consumo de energía activa total B , equivale a la sumatoria de las potencias activas A individuales de las cargas monofásicas conectadas a él, como se indica en la ecuación (3-1).

La información recopilada por medidores inteligentes AMI / AMR que permitan realizar curvas de demanda y estudios de predicciones de consumos, serán la fuente para la implementación de las soluciones propuestas en este trabajo.

$$A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n = B$$

$$\sum_{k=1}^n A_k = B \quad (3-1)$$

Se disponen interruptores X para cada una de las cargas, que indican conexión (=1) o no conexión (=0) de las cargas monofásicas a una fase en un instante de tiempo, como se esquematiza en la Figura 1.

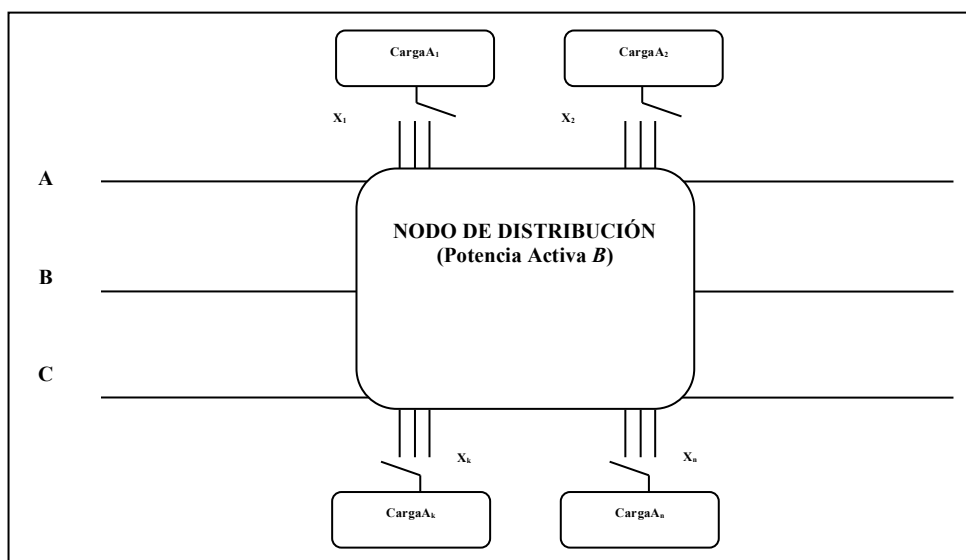


Figura 1: Esquema conexión de cargas en un nodo de distribución. Se buscan interruptores que se conectan a la fase analizada.

En la Tabla (3-1) se muestra un ejemplo de dicha matriz de conexión.

Tabla 3-1: Ejemplo de matriz de conexiones de cargas a un nodo trifásico de distribución. “1” indica conexión a la fase, “0” indica no conexión.

FASE	Carga									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
B	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1
C	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0

Las ecuaciones siguientes (3-2) (3-3) corresponden a la energía total de las cargas conectadas, de acuerdo al valor del vector X, para cada una de las fases,

y la relación con la potencia activa total del nodo. El valor X_{ij} binario pertenece al interruptor de la carga A_i conectado a la fase j .

$$\begin{aligned} A_1 X_{1A} + A_2 X_{2A} + A_3 X_{3A} + A_4 X_{4A} + \dots + A_n X_{nA} &= B_A \\ A_1 X_{1B} + A_2 X_{2B} + A_3 X_{3B} + A_4 X_{4B} + \dots + A_n X_{nB} &= B_B \\ A_1 X_{1C} + A_2 X_{2C} + A_3 X_{3C} + A_4 X_{4C} + \dots + A_n X_{nC} &= B_C \end{aligned} \quad (3-2)$$

$$B_A + B_B + B_C = B \quad (3-3)$$

$$X_{ij} \in \{0/1\} \quad (3-4)$$

$$X_{1A} + X_{1B} + X_{1C} = 1 \quad (3-5)$$

La ecuación (3-4) indica que la variable asignada a un interruptor es binaria, y las (3-5) indica que un interruptor de una carga puede estar asociado a una fase exclusivamente.

El balance de cargas corresponde a una configuración de conexión, de manera tal, que se presente en lo posible un consumo similar de potencia para cada una de las tres fases del nodo de distribución trifásico (B_A , B_B , B_C), como se muestra en las ecuaciones siguientes (3-6) (3-7):

$$\begin{aligned} B_A &= \lambda B \\ B_B &= \lambda B \end{aligned} \quad (3-6)$$

$$\begin{aligned} B_C &= \lambda B \\ \lambda &= 1/3 \end{aligned} \quad (3-7)$$

Este cálculo debe ser realizado para cada instante de tiempo, obteniendo la mejor configuración de los interruptores X_k y las conmutaciones asociadas para las cargas monofásicas.

3.1 Modelo matemático base

En el caso de estudio, el problema a resolver (Función Objetivo FO) es la maximización de la sumatoria de las variables binarias X_k , que son indicadoras de conexión (1) o no conexión (0) de una carga monofásica o usuario k en la solución, sujeta a restricciones de balance de energía en un nodo de distribución en un instante de tiempo determinado. En el modelo se considera una fase a la vez.

La función objetivo asignada para este problema se expresa:

$$\begin{aligned} \max (X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + \dots + X_n) \\ FO = \max \sum_{k=1}^n P_k X_k \end{aligned} \quad (3-8)$$

Sujeta a:

$$\sum_{k=1}^n A_k X_k \leq \lambda B \quad (3-9)$$

Donde:

- P_k : Coeficiente que indica el beneficio de elegir la variable X_k . Para este trabajo los valores P_k son 1. Las cargas se eligen con la misma prioridad.
- X_k : Variable binaria indicadora de conexión (1) o no (0) de la carga k a la fase.
- A_k : Coeficiente que indica el peso o costo de elegir la variable X_k . Para este trabajo los valores A_k corresponden a la potencia consumida por la carga k .
- B : Coeficiente que indica la capacidad o el recurso disponible. Para el efecto, es la potencia entregada por cada fase.
- λ : Factor de porcentaje aplicado al total de la energía del periodo ($=1/3$).

Para la solución de este modelo, se implementaron los algoritmos de Fuerza Bruta, Knapsack (o Mochila 0/1) y Secuenciación de trabajos en Máquinas Paralelas.

3.2 Desarrollo para modelo base

En la literatura se encuentran diferentes ejemplos de solución para este tipo de problemas. Se utilizan métodos de modelos de programación entera binaria lineal, o simplemente programación binaria, y programación dinámica.

Se resuelven problemas con los métodos mencionados y con la herramienta VISUAL BASIC ® 2010 Express.

Retomando:

$$FO = \max \sum_{k=1}^n X_k \quad (3-10)$$

Sujeta a:

$$\sum_{k=1}^n A_k X_k \leq \lambda B \quad (3-11)$$

El factor λ para este modelo corresponde al valor de la potencia activa total repartida en la cantidad de fases ($R_{\text{equilibrio}}$).

El porcentaje de balance de carga, se calcula como la relación entre la asignación de potencia a cada fase y la potencia total (%). El factor de desbalance puede calcularse como la desviación de este porcentaje con el de referencia, que para tres fases sería del 33,33% como se relaciona en la ecuación (3-12).

$$\text{Factor de desbalance \%} = \left| 33,33\% - \frac{P_{fase}}{P_{total}} \right| \quad (3-12)$$

De acuerdo a lo anterior, una fase con el 33,33% de la carga total del nodo tendría un desbalance cero.

3.2.1 Fuerza bruta

La implementación de los algoritmos para resolver el modelo se inició con enfoque de **Fuerza Bruta**. Este algoritmo sirve para verificar todas las posibles soluciones de un problema.

Para el caso particular de esta tesis, se calcula el valor de equilibrio o de referencia ($R_{equilibrio}$), correspondiente a la sumatoria de todas las n cargas o potencias, dividida por tres (cantidad de fases).

Se construye una matriz binaria de tamaño $[2^n - 1, n]$ de todas las posibles combinaciones de las cargas. Para cada uno de los vectores fila bin_k , se realiza el cálculo de la sumatoria de cargas asignadas con el valor "1", $Suma_k$. Con este valor se calcula un vector columna de desviaciones ($Suma_k - R_{equilibrio}$).

n = Número de variables, cantidad de cargas para el estudio.

$Cargas$ = $(A_1, A_2, ..., A_n)$, Vector de cargas o potencias de cada usuario en el periodo a analizar.

$$Requilibrio = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n A_k$$

$2^n - 1$ = Número de posibles combinaciones binarias.

bin_k = $(X_1 = 0 \text{ ó } 1, X_2 = 0 \text{ ó } 1, ..., X_n = 0 \text{ ó } 1)$ Vector con combinación binaria de n variables. Se calcula para cada posible combinación.

$$Suma_k = \sum_{k=1}^n A_k * bin_k$$

$desv_k = Suma_k - R_{equilibrio}$. Se calcula para cada una de las posibles combinaciones. Al igual que cada $R_{equilibrio}$, bin_k , $Suma_k$.

Al finalizar el cálculo se elige la mejor solución. El algoritmo elige el vector bin_k para el que se tenga la menor desviación $desv_k$ con respecto a la referencia o $R_{equilibrio}$. La implementación es simple y funciona adecuadamente para una pequeña cantidad de variables, caso en el cual se garantiza la mejor respuesta. La Figura 2 muestra un ejemplo de resultados de balance para 12 cargas.

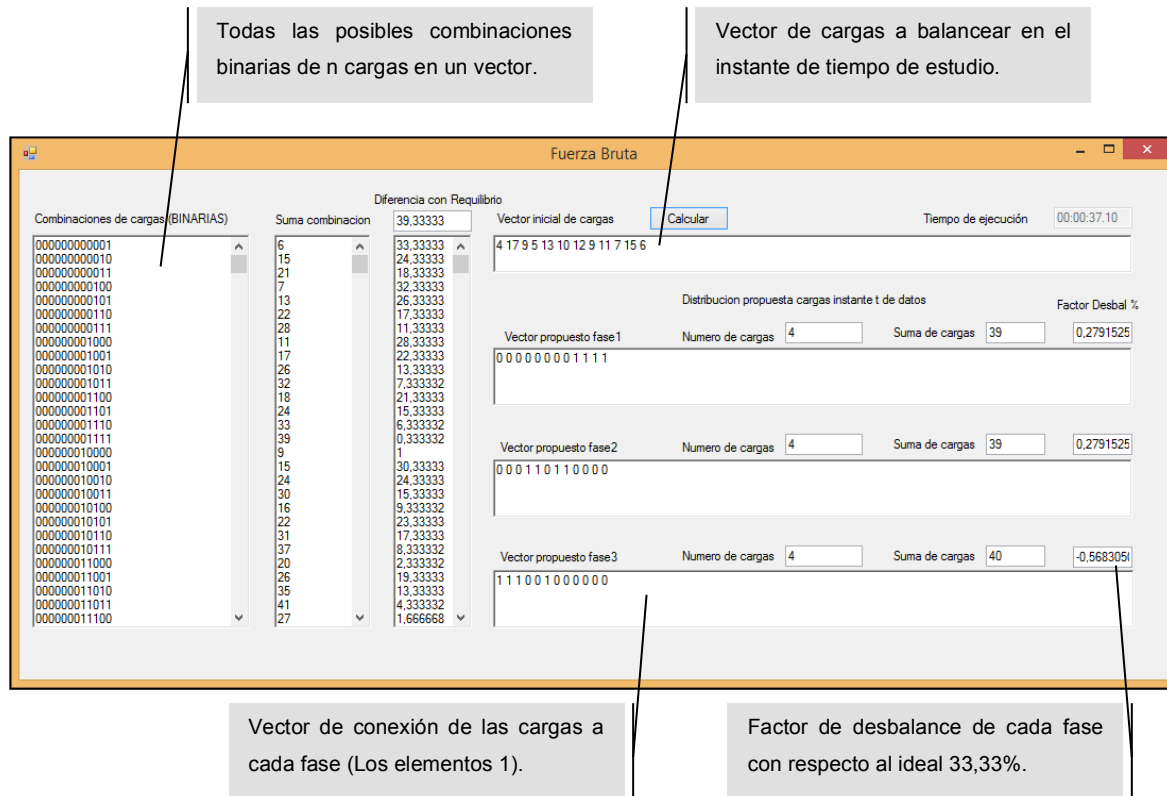


Figura 2: Ejemplo de balance de cargas con algoritmo de Fuerza Bruta. 12 cargas.

En la Figura 2 también se muestra que el tiempo de ejecución con estas variables es de 37.1 segundos. Utilizando la fórmula (3-6), se obtienen los porcentajes de

balance para las fases 33,05%, 33,05% y 33,90% y factores de desbalance de 0,28%, 0,28% y 0,57% respectivamente.

3.2.2 Secuenciación de trabajos en máquinas

En la búsqueda de un mejor método de resolución se realizan pruebas con el procedimiento de **Secuenciación de trabajos en máquinas** o programación de máquinas en paralelo en un taller, asumiendo una fase como una máquina y cada carga como una tarea a asignar. Se requiere considerar en esta metodología la inclusión de una regla de despacho, de las cuales se elige la LPT (selección del trabajo con mayor tiempo de proceso) [33], lo que indica que se asignan primero las potencias mayores o las cargas de mayor consumo. En este método se deben tener en cuenta las limitaciones de las capacidades de las máquinas, y en el modelo se debe incluir una variable binaria que indique que una tarea la realiza solo una máquina.

El algoritmo a implementar consiste en: Ordenar las tareas de forma descendente, las tareas de mayor duración primero, luego se asigna cada tarea a la máquina con menor cantidad de tiempo de tareas asignadas pendientes. Se interpreta para el caso de este estudio, como asignar primero las cargas mayores a las fases con menos carga hasta el momento de cada asignación.

n	=	Número de variables, cantidad de cargas para el estudio.
$CargasOrd$	=	(A_1, A_2, \dots, A_n) . Vector de cargas o potencias de cada usuario en el periodo a analizar. Deben estar ordenados, en forma descendente.
$Suma_1$	=	Cantidad de tiempo o de carga en la máquina o fase 1.
$Suma_2$	=	Cantidad de tiempo o de carga en la máquina o fase 2.
$Suma_3$	=	Cantidad de tiempo o de carga en la máquina o fase 3.
$Maquina_1$	=	$(X_1 = 0 \text{ ó } 1, X_2 = 0 \text{ ó } 1, \dots, X_n = 0 \text{ ó } 1)$ Vector con cargas

asignadas a máquina o fase 1. Se asigna X_k actual =1 si $\text{Suma1} < \text{Suma2}$ y $\text{Suma1} < \text{Suma3}$.

$\text{Maquina}_2 = (X_1 = 0 \text{ ó } 1, X_2 = 0 \text{ ó } 1, \dots, X_n = 0 \text{ ó } 1)$ Vector con cargas asignadas a máquina o fase 2. Se asigna X_k actual =1 si $\text{Suma2} < \text{Suma1}$ y $\text{Suma2} < \text{Suma3}$.

$\text{Maquina}_3 = (X_1 = 0 \text{ ó } 1, X_2 = 0 \text{ ó } 1, \dots, X_n = 0 \text{ ó } 1)$ Vector con cargas asignadas a máquina o fase 3. Se asigna X_k actual =1 si $\text{Suma3} < \text{Suma1}$ y $\text{Suma3} < \text{Suma2}$.

El resultado de la aplicación y las respuestas de este algoritmo se observan en la Figura 3.

Secuenciación de trabajos en máquinas - LPT

Vector inicial de cargas: Numero de cargas: Suma de cargas: Tiempo de ejecución:

Vector ordenado de cargas:

Distribución propuesta cargas instante t de datos

Vector propuesto fase1: Numero de cargas: Suma de cargas:

Vector propuesto fase2: Numero de cargas: Suma de cargas:

Vector propuesto fase3: Numero de cargas: Suma de cargas:

Callouts:

- Vector de cargas a balancear en el instante de tiempo de estudio.
- Cantidad de cargas y energía total del nodo en el instante de tiempo.
- Vector de conexión de las cargas a cada fase (Los elementos 1).
- Cantidad de cargas y total de energía asignada a la fase en el instante de tiempo.

Figura 3: Ejemplo de balance de cargas con algoritmo de Secuenciación de Trabajos en Máquinas. 28 cargas.

Se ejecuta el desarrollo del algoritmo de Secuenciación de Trabajos en Máquinas para 28 cargas. Se obtienen los porcentajes de balance para las fases 33,92%, 33,22% y 32,86% y factores de desbalance de 0,59%, 0,11% y 0,47% respectivamente. Se ejecuta en un tiempo de 0,07 segundos.

3.2.3 Knapsack 0,1

En la siguiente etapa, se realiza la implementación en Programación Dinámica del algoritmo para resolver el problema **KNAPSACK** o de la **Mochila 0,1**. La estrategia de la Programación Dinámica de dividir los problemas en problemas de menor complejidad y resolverlos de manera óptima por etapas se aplica en este algoritmo.

Se ingresa un elemento k a la mochila, con peso A_k y Beneficio P_k . En este momento se obtienen dos mochilas, una de las cuales tiene una capacidad equivalente a $(B - A_k)$ y se le debe calcular el Beneficio o Ganancia G máxima equivalente para la nueva capacidad. Este concepto se ilustra en la Figura 4. En este punto la Ganancia total se expresa como [16] [17]:

$$\text{Ganancia Total} = \text{Max } G (B - A_k) + P_k \quad \text{para } k=1 \text{ hasta } n \quad (3-13)$$

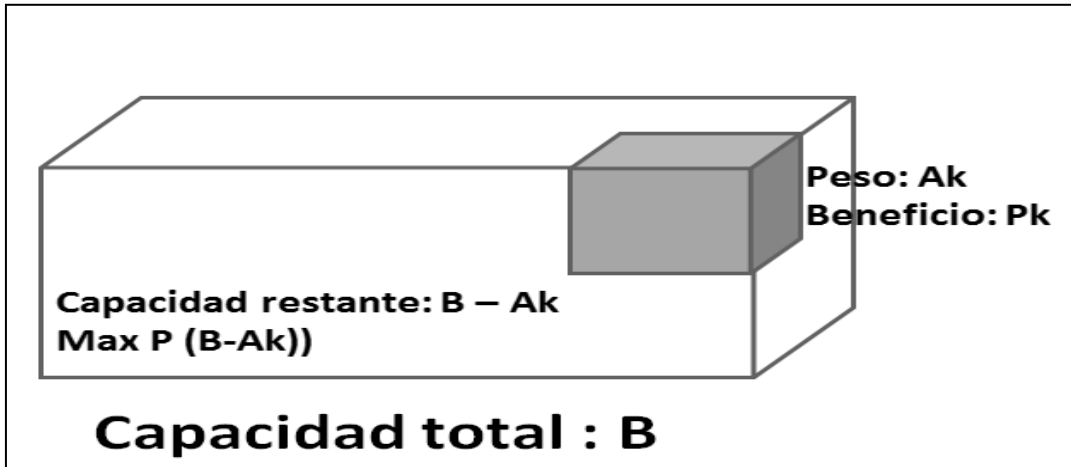


Figura 4: Base para procedimiento de programación dinámica en el algoritmo de la Mochila.

Ingresa a la solución los elementos que maximicen la suma anterior. En el algoritmo se inicia con una maleta de capacidad cero (0), con máxima ganancia cero (0) y se usa como caso base, se almacenan soluciones para evitar al máximo la recursión o repetición de cálculos. $Max G(B=0) = 0$

La relación recursiva para el problema de la mochila (0/1) está expresada por [16] [17]:

$$G(k, B) = \begin{cases} G(k-1) & \text{si } X_k = 0 \\ G(k-1, B - A_k) + P_k & \text{si } X_k = 1 \end{cases} \quad (3-14)$$

Tomando el máximo de ambos valores:

$$G(k, B) = \max[G(k-1, B) ; G(K-1, B - A_k) + P_k] \quad (3-15)$$

Posteriormente se utiliza otra función recursiva en la que se determinan los elementos ingresados en la solución.

Si $G(k, B) = G(k-1, B)$, el elemento k no se selecciona, y se seleccionan los objetos correspondientes a la mejor solución para $k-1$ objetos, $G(k-1, B)$. Si

$G(k, B) \neq G(k-1, B)$, el elemento k se selecciona, y se seleccionan los objetos correspondientes a la mejor solución para $k-1$ objetos, $G(k-1, B - A_k)$ [16].

Para el caso en estudio, una mochila corresponde a una fase, los valores de P_k para cada carga son iguales a 1, e iguales entre sí, ya que elegir cualquier carga tiene el mismo beneficio. Los valores de A_k o pesos corresponden a las magnitudes de las potencias o energías activas de las cargas. Deben ser valores enteros, ya que en la implementación de este algoritmo, y combinaciones de estos se toman como subíndices en las resoluciones de subproblemas.

La Figura 5 muestra las variables y respuestas del algoritmo para un ejemplo de 28 cargas.

The screenshot shows a window titled "Knapsack o Mochila 0-1". It contains the following fields and data:

- Vector inicial de cargas:** 4 7 9 5 13 2 10 12 1 9 11 7 15 26 4 17 19 5 23 12 1 12 11 9 11 7 15 6
- Numero de cargas:** 28
- Suma de cargas:** 283
- Tiempo de ejecución:** 00:00:00.07
- Vector propuesto fase 1:** 4 7 9 5 0 2 10 12 1 9 11 7 0 0 4 0 0 5 0 0 1 0 0 0 0 7 0 0
- Numero de cargas:** 15
- Suma de cargas:** 94
- Vector propuesto fase 2:** 0 0 0 0 13 0 0 0 0 0 0 15 0 0 17 0 0 0 0 11 9 11 0 0 6
- Numero de cargas:** 8
- Suma de cargas:** 94
- Vector propuesto fase 3:** 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 26 0 0 19 0 23 0 0 12 0 0 0 0 15 0
- Numero de cargas:** 5
- Suma de cargas:** 95

Callouts provide the following explanations:

- Vector de cargas a balancear en el instante de tiempo de estudio.** (Points to the initial vector)
- Cantidad de cargas y energía total del nodo en el instante de tiempo.** (Points to the total sum of 283)
- Vector de conexión de las cargas a cada fase.** (Points to the phase vectors)
- Cantidad de cargas y total de energía asignada a la fase en el instante de tiempo.** (Points to the phase sums)

Figura 5: Ejemplo de balance de cargas con algoritmo de Mochila 0-1 para 28 cargas.

Se ejecuta el desarrollo del algoritmos de la Mochila 0-1, obteniendo los porcentajes de balance para las fases 33,216%, 33,216% y 33,568% y factores de desbalance de 0,114%, 0,114% y 0,238% respectivamente. En la Figura 5 se muestra que el algoritmo se ejecuta en un tiempo de 0,07 segundos para este conjunto de datos.

Los tres algoritmos presentados anteriormente realizan un balance con datos de un tiempo $t-1$ en un tiempo t , es decir, se usan los datos de un tiempo anterior para balancear en el tiempo actual. Una mejor solución debería resolver el balance con estudios de largo plazo de perfiles de consumo de usuarios y circuitos.

3.3 Planteamiento de propuesta alternativa

El problema de balance de energía se ha trabajado utilizando conmutaciones de las cargas en diferentes tiempos. Dichas conmutaciones afectan la calidad de la energía. Es por esto que esta tesis decidió utilizar un enfoque diferente, donde se permita la conmutación solamente al inicio de un lapso de tiempo largo.

Se plantea la implementación de una nueva metodología para solucionar el problema, de tal forma que se logre un balance adecuado en los tiempos específicos. La solución que se propone de ahora en adelante en este trabajo utiliza los perfiles de consumo de energía en varios periodos de tiempo, con el fin de lograr la mejor configuración de conexión de las cargas en las fases disponibles. No modifica los perfiles de consumo ni desplaza la carga en el tiempo a diferencia de estudios referenciados. Para esto, se desarrolla el modelo de la sección 3.4.

3.4 Modelo matemático con series de tiempo

De acuerdo al esquema de la Figura 1, se tiene:

$$\begin{aligned}
 &A_{11}X_{11A} + A_{11}X_{11B} + A_{11}X_{11C} + A_{21}X_{21A} + A_{21}X_{21B} + A_{21}X_{21C} + \dots \\
 &A_{31}X_{31A} + A_{31}X_{31B} + A_{31}X_{31C} + A_{41}X_{41A} + A_{41}X_{41B} + A_{41}X_{41C} + \dots \\
 &+ A_{mn}X_{mnA} + A_{mn}X_{mnB} + A_{mn}X_{mnC} = B
 \end{aligned} \quad (3-16)$$

La ecuación anterior (3-16) corresponden a la energía total de las cargas conectadas para un instante de tiempo 1. El valor X_{ijF} binario pertenece al interruptor de la carga A_i en el tiempo j conectado a la fase F (X_{31B} es el interruptor de la carga 3 en el tiempo 1 conectado a la fase B).

$$X_{ijF} \in \{0/1\} \quad (3-17)$$

$$X_{ijA} + X_{ijB} + X_{ijC} = 1 \quad (3-18)$$

La ecuación (3-17) indica que la variable asignada a un interruptor es binaria, y las (3-18) indica que un interruptor de una carga puede estar asociado a una fase exclusivamente.

La propuesta planteada corresponde a dejar los interruptores X de cada carga fijos, es decir, buscar una buena configuración para un conjunto de tiempos, eliminando el proceso de conmutaciones en el periodo analizado. De acuerdo a esto se tiene que:

$$X_{ijF} = X_{kjF} = X_{jF} \quad \forall k, j \leq m \quad (3-19)$$

$$X_{11A} = X_{21A} = X_{31A} = \dots = X_{m1A} = X_{1A}$$

Para cada una de las tres fases del sistema:

$$\begin{aligned}
A_{1j}X_{1A} + A_{2j}X_{2A} + A_{3j}X_{3A} + A_{4j}X_{4A} + \cdots + A_{nj}X_{nA} &= B_{jA} \\
A_{1j}X_{1B} + A_{2j}X_{2B} + A_{3j}X_{3B} + A_{4j}X_{4B} + \cdots + A_{nj}X_{nB} &= B_{jB} \\
A_{1j}X_{1C} + A_{2j}X_{2C} + A_{3j}X_{3C} + A_{4j}X_{4C} + \cdots + A_{nj}X_{nC} &= B_{jC}
\end{aligned} \tag{3-20}$$

El balance de cargas corresponde a una configuración de conexión, de manera tal, que se presente en lo posible un consumo similar de potencia para cada una de las tres fases del nodo de distribución trifásico (B_A , B_B , B_C), como se muestra en las ecuaciones siguientes (3-19) (3-7):

$$B_{jA} + B_{jB} + B_{jC} = B_j \tag{3-21}$$

$$B_{jA} = \lambda B_j$$

$$B_{jB} = \lambda B_j \tag{3-22}$$

$$B_{jC} = \lambda B_j$$

El factor λ para el caso de un solo instante de tiempo se define como $\lambda = 1/3$ para realizar los cálculos. En el caso de múltiples periodos de tiempo λ se inicializa en un valor de referencia.

El desarrollo y el modelo siguiente se realiza para una sola fase del sistema.

La función objetivo permanece, pero en el planteamiento se consideran las restricciones adicionales de energía disponible para cada instante de tiempo para una de las fases.

$$FO = \max \sum_{k=1}^n X_k \tag{3-23}$$

Sujeta a:

$$A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + A_{13}X_3 + A_{14}X_4 + \cdots + A_{1n}X_n \leq B_1$$

$$A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + A_{23}X_3 + A_{24}X_4 + \cdots + A_{2n}X_n \leq B_2$$

$$A_{31}X_1 + A_{32}X_2 + A_{33}X_3 + A_{34}X_4 + \dots + A_{3n}X_n \leq B_3$$

...

$$A_{m1}X_1 + A_{m2}X_2 + A_{m3}X_3 + A_{m4}X_4 + \dots + A_{mn}X_n \leq B_m$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n A_{ik} X_k \leq B_i \quad (3-24)$$

Donde:

A_{ik} : Los valores de estos coeficientes corresponden a las potencias activas (o Beneficios) de las cargas (o usuarios) k , en un tiempo i .

B_i : Corresponden a las variables de recursos (Capacidad disponible), que en este caso es la potencia total entregada a los usuarios en el tiempo i .

El grupo de ecuaciones del modelo garantiza que se cumplen los límites de potencia balanceada por fase en cada instante de tiempo analizado. Los valores n y m , corresponden a la cantidad de cargas o usuarios, y la cantidad de períodos de tiempo respectivamente.

Este planteamiento requiere de técnicas de programación lineal y herramientas de optimización para obtener los resultados necesarios.

3.5 Desarrollo para el modelo con series de tiempo

El algoritmo elegido para la resolución del modelo final propuesto es Branch & Bound (Ramificación y Acotación) de variables binarias.

3.5.1 Método simplex

En la ejecución del algoritmo Branch & Bound (B&B), se requiere de soluciones óptimas intermedias denominadas relajadas, a las cuales se les retira la restricción de entero (o binario). Por lo anterior se requiere de la implementación de un algoritmo adicional de optimización. En el caso de este trabajo, se utiliza el método Simplex.

Se debe considerar que de acuerdo a los datos de cada problema, es posible que con el método Simplex no tenga solución o sea infactible [12].

Las variables de entrada que se requieren para la solución relajada del modelo son:

- A_{ik} : Los valores de estos coeficientes corresponden a las potencias activas (o Beneficios) de las cargas (o usuarios) k , en un tiempo i .
- B_i : Corresponden a las variables de recursos (Capacidad disponible), que en este caso es la potencia total entregada a los usuarios en el tiempo i .

Las respuestas de las variables corresponden al valor óptimo de la función objetivo, pero no cumplen con la restricción de binarias, es en este punto que se aplica el procedimiento (B&B).

3.5.2 Branch & Bound (Ramificación y Acotación)

Para la generación del árbol de decisiones, un problema se divide en dos subproblemas, para cada uno de los cuales puede ocurrir que [12]:

- El subproblema es no factible, se da por terminado.
- La solución es entera, mejor que la solución entera conocida, es candidata a solución. No se ramifica más el subproblema. En el caso de

programación binaria, debe cumplir que en la solución solo haya valores 0 y 1 para las variables.

- Es fraccionario, mejor que la solución entera conocida más adecuada. Se continúa ramificando este subproblema.
- Es peor que la mejor entera conocida. No se ramifica más el subproblema.

La cantidad de subproblemas a analizar se reduce de una manera significativa con la aplicación de esta estrategia. De acuerdo a la cantidad de variables n , el árbol tiene n niveles y una cantidad de nodos a evaluar que se incrementan de modo exponencial, equivalentes a 2^{n+1} .

[34] es la referencia más importante para la implementación del algoritmo B&B binario en este trabajo. La Figura 6 muestra un ejemplo de un árbol completo de decisión para tres variables, con sus respectivos nodos, ramas y niveles. Cada uno de los nodos del diagrama, corresponde a un vector fila binario de tamaño n (número de cargas).

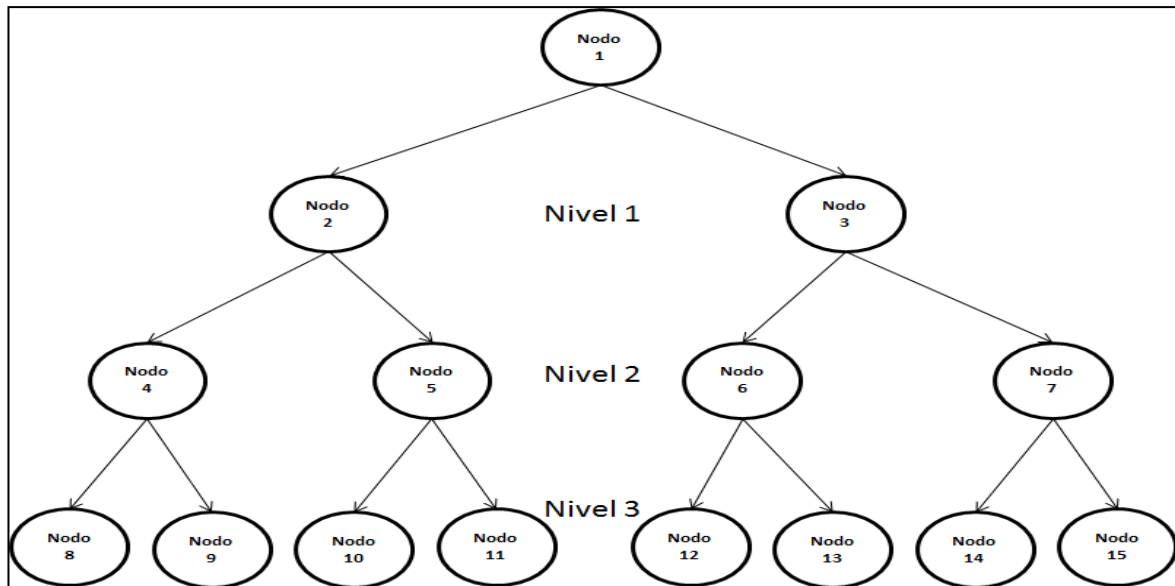


Figura 6: Ejemplo árbol de decisión completo para 3 variables.

3.5.3 Estrategia de ramificación

En el método B&B, un árbol binario indica toda la secuencia de subproblemas resueltos y el valor de la función objetivo cuando el problema es factible de resolverse. Está compuesto de un nodo raíz del árbol, y de subárboles izquierdo y derecho. Los subárboles de un nodo pueden estar vacíos [35].

Tal como en el modelo base [34], se evalúan las variables en el orden natural planteado, $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$.

En el algoritmo implementado en el presente trabajo se va realizando la construcción del árbol con estrategia FIFO [34] y se realiza la evaluación de la función objetivo. Se genera la información de los nodos viables con todas sus respuestas enteras, los cuales no se ramifican; y de los nodos viables con respuestas mixtas, los cuales deben continuar el proceso de ramificación. Se asignan los valores $Val=1$ o $Val=2$ respectivamente en la función de viabilidad que se referencia más adelante.

Se realiza la comparación con el mejor valor de la función objetivo obtenida en pasos anteriores, y se actualiza el valor si aplica en la variable asignada para el efecto.

3.5.4 Estrategia de acotación

Cualquier solución con un valor de la función objetivo menor a la mejor obtenida en soluciones anteriores se descarta. De igual manera se descartan las soluciones que no cumplan al menos una de las restricciones.

Las soluciones viables y con valor de función objetivo mejor a la mejor obtenida en soluciones anteriores continúan en el procedimiento. Si las variables en la solución son enteras se define como nueva mejor solución.

3.5.5 Estructura de datos

En [35], representan los nodos del árbol definiéndolos como elementos de un arreglo. En este trabajo se representan en una variable-vector dinámico como en [13]. El valor de la mejor solución solo se almacena una vez.

Los vectores y matrices que se usan en el algoritmo, corresponden a estructuras dinámicas que pueden cambiar de valores en cada ciclo del algoritmo. Se tienen almacenados en la memoria los nodos vivos o hijos y los nodos padres para cada análisis.

La implementación realizada para B&B se realiza con la metodología [34] que se sintetiza a continuación, y se comprueba con ejemplos de la literatura base [34].

- Ramificación: Dividir el conjunto de soluciones de las variables, fijando valores en $X_k = 0$ y $X_k = 1$, obteniendo dos subconjuntos. Se va ramificando hasta obtener una solución óptima en la que todas las variables sean binarias. Se seleccionan las variables en el orden natural $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$.
- Acotación: Por medio del método Simplex se resuelve el subproblema relajado obteniendo la solución óptima de la Función Objetivo (**FO**).
- Viabilidad: Se realizan 3 pruebas al resultado obtenido:
 - Si $FO \leq FO_{mejor}$. No se consideran más subproblemas. No se tienen en cuenta los que tengan soluciones cuyo límite sea menor a **FO_{mejor}**, que corresponde a la mejor solución de las obtenidas anteriormente.
 - Se descarta cuando se obtengan soluciones no viables. Que violen las restricciones o límites.
 - Si $FO > FO_{mejor}$. Se redefine como nuevo **FO_{mejor}**. Se realizan las pruebas a los siguientes nodos.

Las variables necesarias para la solución del modelo específico del trabajo son:

- A_{ik} : Los valores de estos coeficientes corresponden a las potencias activas (o Beneficios) de las cargas (o usuarios) k , en un tiempo i .
- B_i : Corresponden a las variables de recursos (Capacidad disponible), que en este caso es la potencia total entregada a los usuarios en el tiempo i .

Adicionalmente se requieren los datos que resultan del cálculo Simplex respectivo.

En el modelo implementado, se ajusta el B_i como un porcentaje de la potencia entregada a los usuarios para obtener la solución de conexión para una fase, que en el caso ideal corresponde a la tercera parte ($\lambda=1/3$). Para la solución de conexión del conjunto de dos fases sería dos terceras partes ($\lambda=2/3$), considerando que el sistema a analizar es trifásico. Idealmente, cada fase debería tener el 33% de la demanda total. Sin embargo, por la característica de valores discretos de las cargas, estos factores difieren en la respuesta, pero se pueden tomar como referencias o límites inferiores en el modelo. En el Anexo A se muestran detalles del software desarrollado para el Balance con algoritmo de Branch and Bound.

4.Descripción de la implementación de balance con Branch and Bound

Se realiza con la herramienta VISUAL BASIC ® 2010 Express. No se utilizan bibliotecas especiales para la implementación.

Todos los datos, desarrollo y resultados de esta sección se hacen con referencia a un nodo simulado con 10 cargas y consumos de energía para 72 horas. Los datos completos se muestran en el Anexo C.

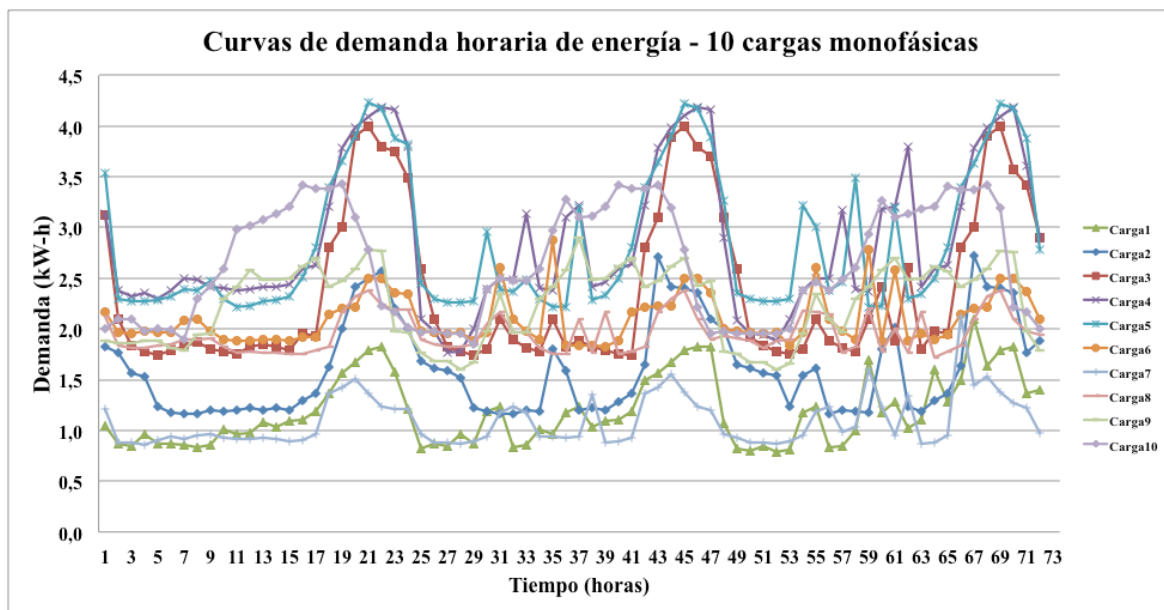


Figura 7: Ejemplo de demandas de cargas monofásicas a balancear. Tomadas de [13].

Se requiere de la información de los consumos de energía de varias cargas o usuarios monofásicos en múltiples periodos de tiempo, que pueden ser horas. Estos usuarios se consideran conectados a un nodo de un sistema trifásico de distribución.

La aplicación responde con una matriz sugerida de conexión para balancear las cargas en el conjunto de periodos de tiempo analizado.

En el futuro, con la implementación de tecnologías de almacenamiento de información y de recolección de datos de medidores de energía con sistemas inalámbricos de comunicaciones, el ingreso también puede ser automatizado.

4.1 Ejecución del algoritmo y cálculos de balance

- 1) El procedimiento se inicia con la matriz de coeficientes de los consumos horarios de energía para cada una de las cargas del análisis A_{ik} . Estos están representados en la Figura 7.
- 2) Se procede con los cálculos de los valores de las energías activas totales (B_i) para cada periodo de tiempo. Corresponde a la sumatoria de las energías de cada carga, para cada periodo de tiempo i .
- 3) Se asignan los porcentajes (λ) iniciales de B_i para el cálculo de las etapas 1 y 2 del algoritmo como se muestra en la Figura 8, que determinan los vectores respuesta para dos y una fase respectivamente. En el algoritmo se inician estos factores en 50% y 40% respectivamente ($\lambda_1 = 0.5$, $\lambda_2 = 0.4$).

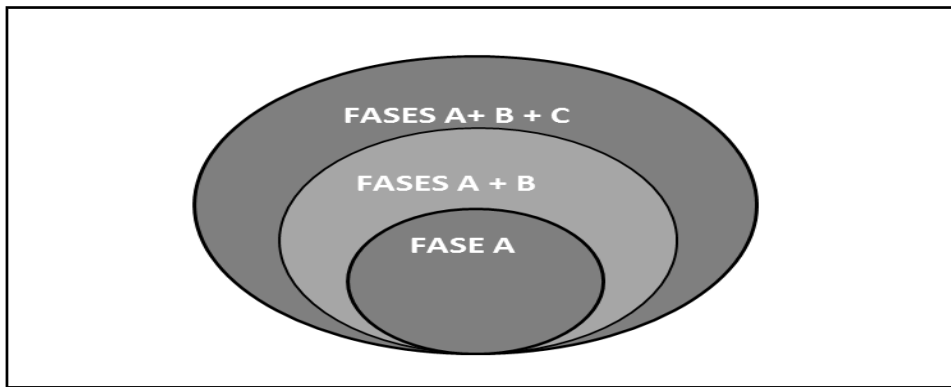


Figura 8: Esquema de aplicación del algoritmo B&B al balance de cargas.

- 4) El algoritmo procede a calcular los vectores con la pareja de factores más próxima a la establecida inicialmente (0.5;0.4) por el método de Branch and Bound para la que existe respuesta. En algunos casos se generan vectores cero, cuando el subproblema no es factible.

- 5) Al obtener los vectores respuesta se realizan los cálculos de los factores de pérdidas (f_{dp}) para cada una de las fases, tanto para la configuración inicial de conexiones como para las configuraciones respuesta del algoritmo.
- 6) Se compara el valor máximo de los f_{dp} de cada fase para la configuración inicial y la de respuesta. Si el f_{dp} máximo de respuesta es menor que el máximo inicial, la respuesta es candidata como opción de mejora del balance. Si no lo es, se realiza un nuevo cálculo.
- 7) En el caso de respuesta cero en algún vector, se realiza un incremento automático y se varían los porcentajes iniciales en un factor de incremento fijado en 0,01 (o 0,005) para ambos factores de manera independiente, hasta un valor máximo establecido. Primero se incrementa el factor para la etapa 2 (λ_2 , una sola fase) hasta un límite de 0,7 (70%), y en este momento se incrementa el factor de la etapa 1 (λ_1 , dos fases) hasta el valor máximo de 0,95, regresando el factor de etapa 2 a su valor mínimo y repitiendo el ciclo. Durante este proceso se pueden obtener varias respuestas con mejoras en el balance. Con este ajuste se disminuye la posibilidad de obtener respuestas no factibles.

En la primera etapa del análisis, el cálculo del vector de soluciones corresponde a las fases A y B (1 y 2) simultáneamente. La segunda etapa, calcula la fase A (1). En la tercera etapa se calculan las fases B y C (2 y 3) como las diferencias de las soluciones de las primeras dos etapas.

4.2 Factor de comparación: Factor de pérdidas

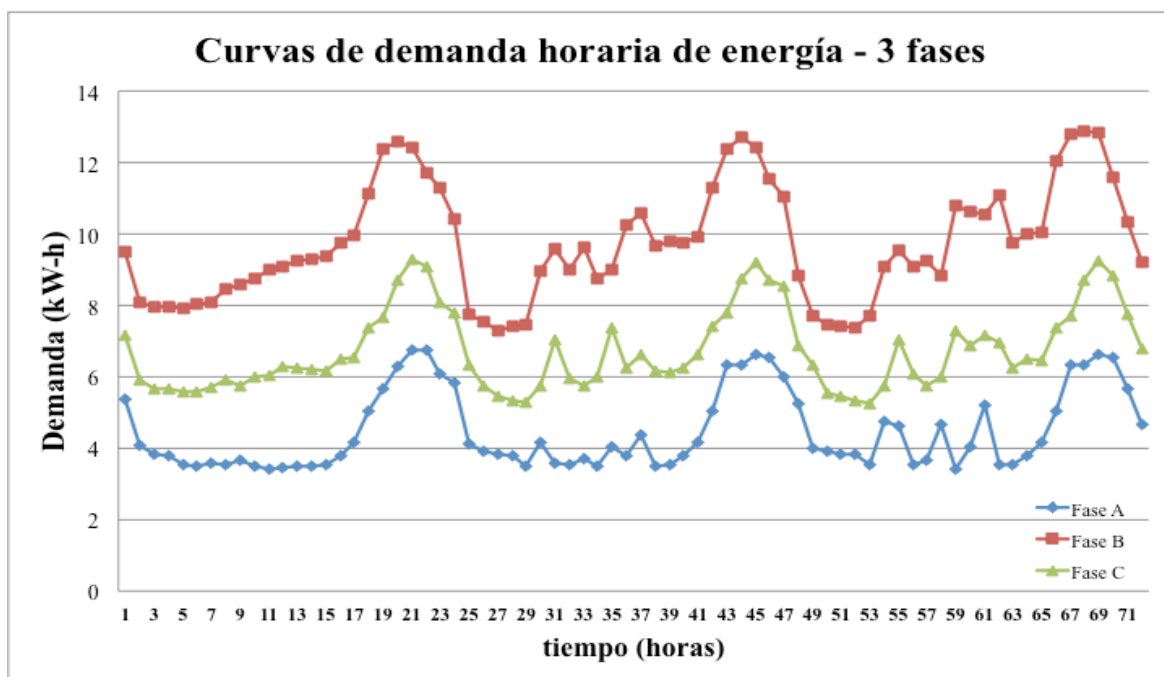
Durante el desarrollo de los algoritmos para un solo instante de tiempo, se usa como referencia del factor de desbalance la relación entre el valor total de la

energía activa del periodo y la cantidad de fases del sistema , como se expresa en la ecuación (3-12).

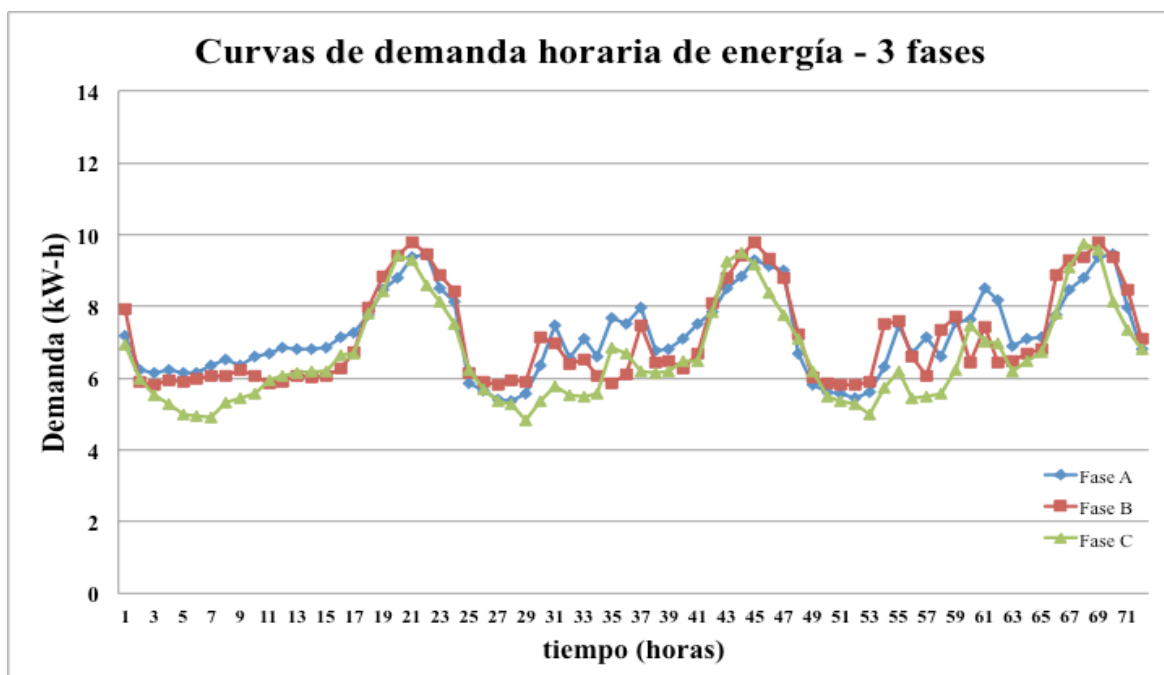
En el caso de múltiples instantes de tiempo esta relación no es factible de aplicar. Se realizaron análisis con desviaciones estándar, desviaciones del promedio, relación entre cargas y cargas máximas, entre otras, sin obtener información que se pueda usar para la comparación de los resultados.

Otros indicadores del mejoramiento en el balance de cargas son: la disminución del valor pico mayor (el máximo de las tres fases), la menor dispersión de los datos, y la nivelación de las curvas de demanda. En esta tesis se utiliza para la comparación de los resultados el factor de pérdidas expresado en (2-2).

El algoritmo implementado con Branch and Bound puede generar diferentes opciones para balance. Para determinar cuál es la mejor opción, se calculan los factores de pérdida (fdp) por cada fase y se selecciona el mínimo valor máximo. La Figura 9 (a) muestra un ejemplo de curvas de demanda de fases que no están balanceadas. En este caso, el máximo fdp entre estas es de 11.82%. La Figura 9 (b) muestra la opción generada por el algoritmo y seleccionada a partir de su máximo fdp, que es 6.45%. Cabe aclarar que se generan varias soluciones y se selecciona la de la figura 9 (b) porque dicho máximo corresponde al mínimo valor de todos los máximos generados en las diferentes soluciones. Los resultados detallados se encuentran en el anexo A.



(a) Antes de Balance



(b) Después del Balance

Figura 9: Ejemplo de datos de cargas (a) antes y (b) después de aplicar el algoritmo implementado.

5. Sistema de comunicaciones

Las opciones de WiFi y ZigBee son las de mejor alcance para las necesidades de sistemas de distribución convencionales (por ejemplo urbanos) en el segmento Home Area Network (HAN) de la SG. La red inalámbrica de sensores basada en WiFi, tiene ventajas respecto a ZigBee en aspectos como el alto ancho de banda, rango de cobertura, relación costo-beneficio, fácil expansión, alta robustez, seguridad, entre otros [7].

La tecnología WiFi se muestra promisorio para HAN. Es de hecho la red inalámbrica de mayor despliegue global y puede soportar altas tasas de transmisión de datos a costos razonables. Está basado en una tecnología madura con buenos niveles de interoperabilidad, encriptación, autenticación y seguridad. Se torna más convincente con la introducción de los dispositivos WiFi de bajo consumo [36].

Medidores inteligentes como el Shark de referencias 100S, 200 y 200T usados para pruebas en esta tesis cuentan con interfaces Ethernet y WiFi [37].

La implementación en la práctica de la metodología desarrollada en esta tesis requiere de AMI / AMR como fuente de información. En cumplimiento del objetivo específico tres, se selecciona WiFi por las ventajas expuestas en las referencias anteriores. Adicionalmente se incluye la facilidad de consecución, reemplazo e intercambio de los dispositivos. La interoperabilidad es un punto adicional de peso, con la cual se pueden realizar pruebas con diferentes marcas y condiciones ambientales.

6.Pruebas y resultados

La implementación se ejecutó en un PC con las siguientes características:

- Procesador : Intel® Core™ i3-2365M CPU @ 1.4GHz
- Memoria instalada : 4GB
- Tipo de sistema : Sistema operativo de 64 bits, procesador x64

Las pruebas se realizan con sistemas o nodos teóricos trifásicos.

6.1 Simulación algoritmos iniciales

Se desea comparar el rendimiento de los tres algoritmos iniciales, los cuales se aplican a un vector inicial de cargas con valores enteros. Cada algoritmo debe arrojar la matriz de conexiones y no puede dividir o cambiar los valores de las cargas. Para las pruebas se definieron las siguientes variables:

Variable independiente:

- Algoritmo: Fuerza Bruta, Secuenciación y Mochila
- Número total de cargas: 10, 14 y 18.

Variables dependientes:

- Tiempo de ejecución del algoritmo implementado.
- Máximo Porcentaje de desbalance, calculado con la ecuación (3-6).

Se escoge el máximo porcentaje para mostrar el peor caso.

Número de repeticiones: 10

La Tabla número 6-1 muestra los resultados principales de las simulaciones con los algoritmos iniciales de Fuerza Bruta, Secuenciación de trabajos y Mochila.

Tabla 6-1: Resultados de prueba de algoritmos iniciales.

Algoritmo	No. Cargas	Tiempo de ejecución promedio (seg)	Máximo Porcentaje de desbalance
Fuerza Bruta	10	5.98	0.79 %
Secuenciación	10	0.02	3.11 %
Mochila	10	0.02	5.38%
Fuerza Bruta	14	302.36	0.67%
Secuenciación	14	0.03	2.12 %
Mochila	14	0.03	3.4%
Fuerza Bruta	18	-	-
Secuenciación	18	0.04	2.35%
Mochila	18	0.03	2.81%

Se muestra que para 18 cargas, el algoritmo de Fuerza Bruta no se pudo ejecutar satisfactoriamente, debido a la carga computacional. Se finaliza manualmente después de un alto tiempo de espera (>5 minutos).

Se observa que los mejores porcentajes de desbalance se obtienen con el algoritmo de Fuerza Bruta, dado que dicho algoritmo revisa todas las posibles combinaciones. Sin embargo, el algoritmo presenta un alto costo computacional en tiempo de ejecución y es limitado a una poca cantidad de variables.

Secuenciación de trabajos y Mochila implementados presentan excelentes tiempos de respuesta. Se observa en la Tabla 6-1 que para el caso de Secuenciación los porcentajes de desbalance son mejores que los de Mochila.

6.2 Simulación algoritmo con series de tiempo

Para el modelo de series de tiempo, se generan árboles de decisión en los que se muestra el nodo respuesta del método para las dos etapas de aplicación de Branch and Bound de cada problema. Se generan también los vectores de conexión y las gráficas de las curvas de demanda inicial y balanceada por la aplicación.

Se desea comparar el rendimiento del algoritmo final, para lo cual se definieron las siguientes variables:

Variables independientes:

- Número total de cargas: 10, 14 y 18.
- Periodos de tiempo: 24, 72

Variables dependientes:

- Tiempo de ejecución del algoritmo implementado.
- Factor de pérdidas, calculado de acuerdo con la ecuación (2-2).

Número de repeticiones: 10

Nótese que se utilizaron las cargas de [15] como una de las repeticiones del caso de 10 cargas y 72 periodos de tiempo.

La Tabla número 6-2 muestra los resultados principales de las simulaciones.

Tabla 6-2: Resultados de prueba de algoritmo final Branch and Bound.

No. Cargas	Periodos de tiempo	Tiempo de ejecución promedio (seg)	Tiempo máximo de ejecución (seg)	Máxima mejora de factor de pérdidas al balancear
10	24	2,126	4,64	5,39%
10	72	6,786	15,28	5,38%
14	24	11,784	49,06	5,11%
14	72	11,483	20,37	5,37%
18	24	51,979	206,4	8,25%
18	72	35,791	68,2	5,82%

En el caso del algoritmo Branch and Bound se debe tener la consideración del tiempo de ejecución relacionado con el número de cargas y con la ubicación del nodo respuesta en el árbol de decisión. El número de periodos de tiempo no parece tener mucha influencia en los resultados de tiempo de ejecución en las simulaciones realizadas durante el proyecto.

Se obtiene una mejora para el factor de pérdidas final en 51 de los 60 casos simulados con este algoritmo (85%).

6.3 Pruebas de laboratorio

Se realizan pruebas de laboratorio para verificar el comportamiento de un sistema trifásico antes y después de balancear con el algoritmo Branch and Bound.

6.3.1 Comunicación inalámbrica del medidor WiFi (802.11)

Se realizan pruebas de comunicación inalámbrica del medidor Shark 100 de acuerdo al trabajo [38]. En este caso se utilizaron dos medidores, uno con módulo WiFi incorporado, y otro con un módulo externo. Estos módulos se pueden diferenciar en la Figura 10.

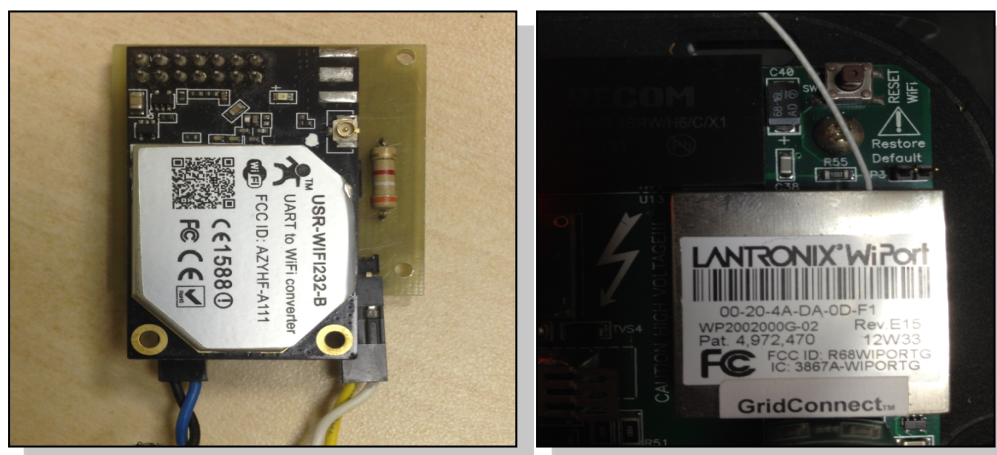


Figura 10: Módulos inalámbricos de comunicación para el medidor Shark 100 (a) externo e (b) interno.

Se conectó un punto de acceso marca Linksys, referencia WRT54G para la comunicación con el medidor. La configuración de la conexión se detalla en la Figura 11.

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
1) Network/IP Settings:
   Network mode ..... Wireless Only
   IP Address ..... 192.168.1.140
   Default Gateway ..... 192.168.1.1
   Netmask ..... 255.255.255.0
2) Serial & Mode Settings:
   Protocol ..... Modbus/RTU, Slave(s) attached
   Serial Interface ..... 57600, 8, N, 1, RS232, CH1
3) Modem/Configurable Pin Settings:
   CP0..tGPIO (In) Wired CP1..tGPIO (In)
   CP2..tGPIO (In) CP3..tGPIO (In)
   CP4..tGPIO (In) CP5..tGPIO (In)
   CP6..tGPIO (In) CP7..tGPIO (In)
   CP8..tGPIO (In) CP9..tGPIO (In)
   RTS Output ..... Fixed High/Active
4) Advanced Modbus Protocol settings:
   Slave Address/Unit ID Source .. Modbus/TCP header
   Modbus Serial Broadcasts ... Disabled (Id=0 auto-mapped to 1)
   MB/TCP Exception Codes .... Yes (return 000H and 000H)
   Char. Message Timeout ..... 00050msec, 05000msec
5) WLAN Settings:
   WLAN ..... Enabled, network:
   Topology ..... Infrastructure, Country: US
   Security ..... Authentication: PSK
   Encryption: TKIP+WEP
   TX Data rate ..... 11 Mbps auto fallback
   Power management ..... Disabled
Default settings. $Save, Quit without save
Select Command or parameter set (1..6) to change:
Parameters saved. Restarting ...

Se ha perdido la conexión con el host.
C:\>_

```

Figura 11: Conexión de medidor con módulo WiFi interno incorporado a una red.

Las pruebas arrojan los resultados esperados para la conexión y recepción de información en el PC. Se hace uso del aplicativo creado para el trabajo mencionado [38].

En cumplimiento del último alcance planteado en la sección 1.5, se midió la calidad de la energía al utilizar el sistema de comunicaciones inalámbricas. No se encontraron evidencias de armónicos adicionales en la señal eléctrica de prueba a causa del sistema de comunicaciones. Sin embargo, se encontró que al conectar el medidor Shark, se generan armónicos en la red, debido a la influencia de los circuitos electrónicos del propio medidor que se comporta como una carga no lineal.

6.3.2 Balance de cargas en laboratorio

Se realiza la simulación de un nodo con 9 cargas para 20 periodos de tiempo con el algoritmo implementado. Posteriormente se realizan pruebas en el laboratorio para confrontar resultados. Los equipos de medición para esta etapa fueron los que se muestran en la Figura 12, el analizador de calidad de la energía Fluke 435 y un medidor inteligente Shark 100S.



Figura 12: Medidores utilizados en las pruebas eléctricas de laboratorio.

Las resistencias variables de la Figura 13, se utilizaron para simular cada una de las cargas. Se estableció un tiempo de 4 minutos entre cada variación de cargas. Esta variación se realizó de manera manual.

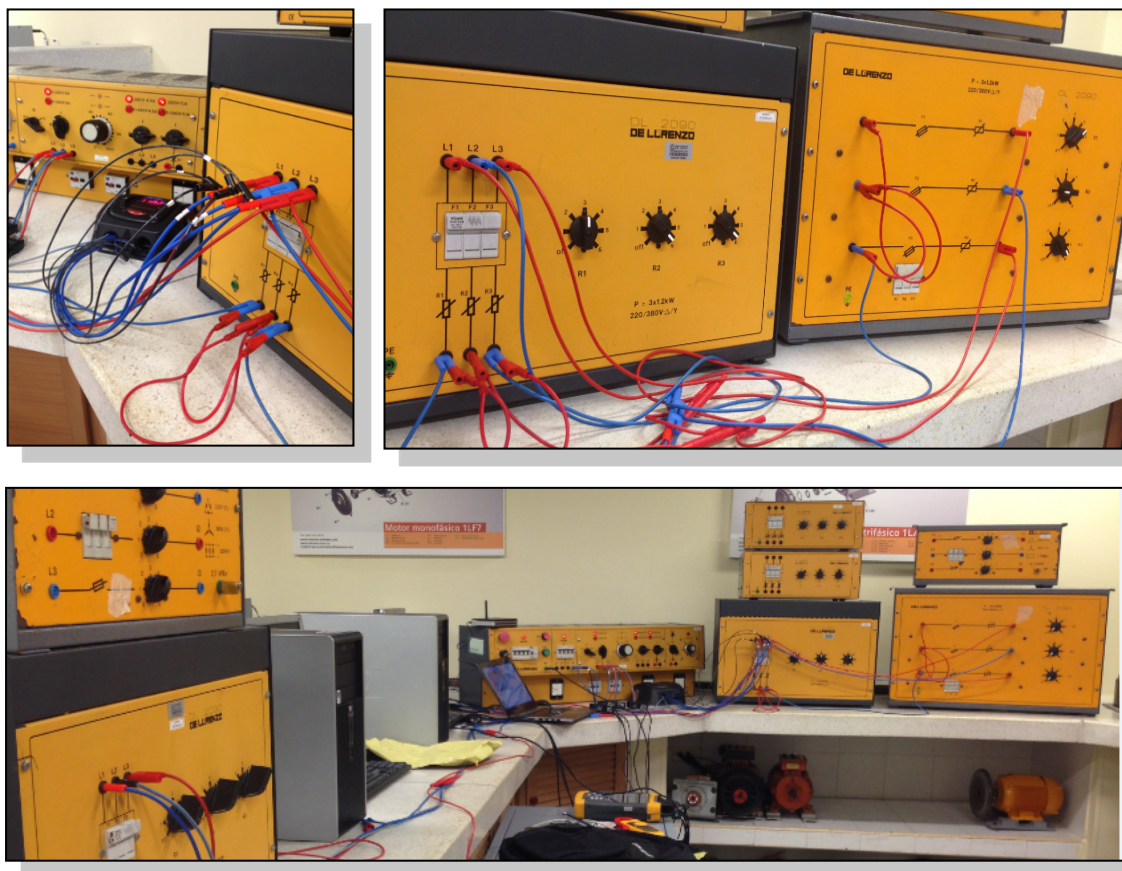


Figura 13: Bancos de resistencias variables.

Los valores promedio de las resistencias se conocían de manera previa, datos con los cuales se realizó la estimación de las corrientes y la posterior simulación. Las tablas con resultados de la simulación y de las pruebas se encuentran en el Anexo E. También resultados gráficos de las mediciones realizadas con el Fluke 435.

En el Anexo E, Tabla E-6 se realiza la comparación de mediciones teóricas y de laboratorio. Se observa que las diferencias en porcentaje entre ambas es bajo, en promedio un 3,35%. Las simulaciones se realizaron con los datos teóricos.

Se verifica la dependencia de la corriente del neutro del nivel de desbalance en las pruebas. En la Tabla E-6 se observan las corrientes de neutro medidas.

7. Conclusiones y Recomendaciones

El desbalance de cargas en sistemas eléctricos es una situación inherente a la forma aleatoria y aislada en la que se construyen, mantienen y operan los circuitos. De igual forma depende del desconocimiento de la forma en la que el usuario consume la energía y de la manera aleatoria en la que se realizan las conexiones de las acometidas al sistema.

El trabajo realizado ofrece una herramienta para que con el previo conocimiento de los perfiles de carga de los usuarios de un nodo se realice, con una matriz de conexión, una adecuada distribución de cada uno de los usuarios a las fases que les suministran la energía.

- Mediante la aplicación de técnicas matemáticas a la solución del problema real del desbalance de cargas, se obtienen resultados importantes que pueden ser implementados en el corto, mediano y largo plazo.
- Se aplicará en circuitos con un alto nivel de desbalance identificado. En estas condiciones el algoritmo ofrece una buena solución.
- El balance se realiza con datos históricos, de acuerdo a las curvas de consumo de energía, que normalmente responden a tendencias o costumbres.
- Una gran ventaja de este trabajo sobre estudios de la literatura es que no requiere de conmutaciones en el periodo del análisis. Se obtiene una respuesta para varios lapsos dentro de un periodo total. Esta situación es importante, ya que las conmutaciones afectan los niveles de la calidad de la energía.
- El sistema propuesto se puede implementar localmente, en cada nodo (por ejemplo en cajas de distribución). Puede ser manual con grupos de trabajo de empresas de energía o, en un futuro, automático con las funcionalidades de Smart Grid.

- La metodología, adaptada e integrada a funcionalidades de SG puede reducir considerablemente la cantidad de conmutaciones de los circuitos, generando mejoría en la calidad del servicio al usuario final, menor desgaste en elementos de control y conmutación, y uso eficiente de redes, transformadores, interruptores y protecciones.
- Las técnicas de balance en circuitos de distribución contribuyen con la reducción de pérdidas de energía, y debe complementarse con técnicas de corrección del factor de potencia de las cargas y de filtros para el control de armónicos.

Durante el desarrollo del trabajo se observó que en el campo de redes de distribución de energía y de comunicaciones hay múltiples necesidades, que pueden y deben complementar a la propuesta que se implementó.

En el futuro se pueden incluir a las funcionalidades del programa varias opciones, y se puede mejorar la forma en la que la información base ingresa para ser procesada. De igual manera se puede mejorar la calidad de la información. Por tanto, como trabajo futuro se recomienda:

- Realizar pruebas con circuitos reales de empresas de energía. Identificar ventajas y desventajas de implementación, y posibles ajustes.
- Extender a varios nodos de un circuito e incluir restricciones de regulación de tensión.
- Ajustar el algoritmo para implementar como solución en hogar, comercio o industria.
- A futuro se puede plantear su mejora, incrementando el análisis gradualmente desde el nivel más bajo (circuitos internos del usuario) hasta el circuito de distribución de baja tensión y por último en el circuito de media tensión.

- Realizar estudios de predicción con la información de los consumos de potencia o energía de las cargas. Se debe automatizar y se debe realizar preferiblemente para cada circuito específico.
- Realizar estudios para analizar las tendencias de consumo por temporadas (verano, invierno, vacaciones, diferentes días de la semana), y preferiblemente por circuito. Se podría aplicar el algoritmo desarrollado de acuerdo a estas estaciones.
- Revisar la opción de mejorar la capacidad del algoritmo para una mayor cantidad de variables.

A. Anexo: Descripción del software desarrollado para Balance con Branch & Bound.

En la Figura A 14 se muestra la pantalla de ingreso a la aplicación de Balance de cargas.



Figura A 14: Presentación inicial de la aplicación.

La aplicación usa la información consignada en un archivo de excel 97-2003 ®. En una de las hojas ("C:\Users\JARIAS\Documents\Libro1.xls", "Hoja1") se tienen las variables de la cargas o consumos de energía en varios periodos de tiempo. En la otra (C:\Users\JARIAS\Documents\Libro1.xls", "Hoja2") se discrimina la matriz inicial de conexión. El detalle se observa en la Figura A 15. La cantidad de cargas corresponde al valor n y las cantidades de periodos de tiempo al valor m del modelo.

Para los casos en el que el método Simplex no obtiene una respuesta inicial, el vector de salida está compuesto de ceros (0), el algoritmo B&B tampoco calcula su respuesta, y se debe recalcular con unos nuevos factores de porcentaje.

Carga1	Carga2	Carga3	Carga4	Carga5	Carga6	Carga7	Carga8	Carga9	Carga10
1,05	1,83	3,12	3,14	3,54	2,17	1,21	2,12	1,88	2,00
0,87	1,77	2,10	2,38	2,30	1,97	0,88	1,84	1,86	2,10
0,85	1,57	1,84	2,32	2,28	1,96	0,88	1,81	1,86	2,10
0,97	1,53	1,78	2,36	2,28	1,98	0,86	1,81	1,89	1,98
0,87	1,23	1,74	2,30	2,29	1,97	0,90	1,84	1,88	2,00
0,87	1,18	1,79	2,38	2,32	1,97	0,94	1,85	1,81	1,99
0,86	1,17	1,82	2,50	2,39	2,08	0,92	1,90	1,79	1,90
0,83	1,16	1,87	2,49	2,38	2,10	0,95	1,90	1,94	2,30
0,86	1,20	1,80	2,42	2,48	1,98	0,97	1,91	1,95	2,43
1,01	1,19	1,78	2,40	2,30	1,90	0,93	1,82	2,30	2,59

Carga1	Carga2	Carga3	Carga4	Carga5	Carga6	Carga7	Carga8	Carga9	Carga10
0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	0	1	1	0	1
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0

Figura A 15: Formato de fuente de datos para la aplicación. Origen libro de Excel 97-2003 ®.

En las Figuras A16 a A20 se muestran resultados de la aplicación durante la ejecución.

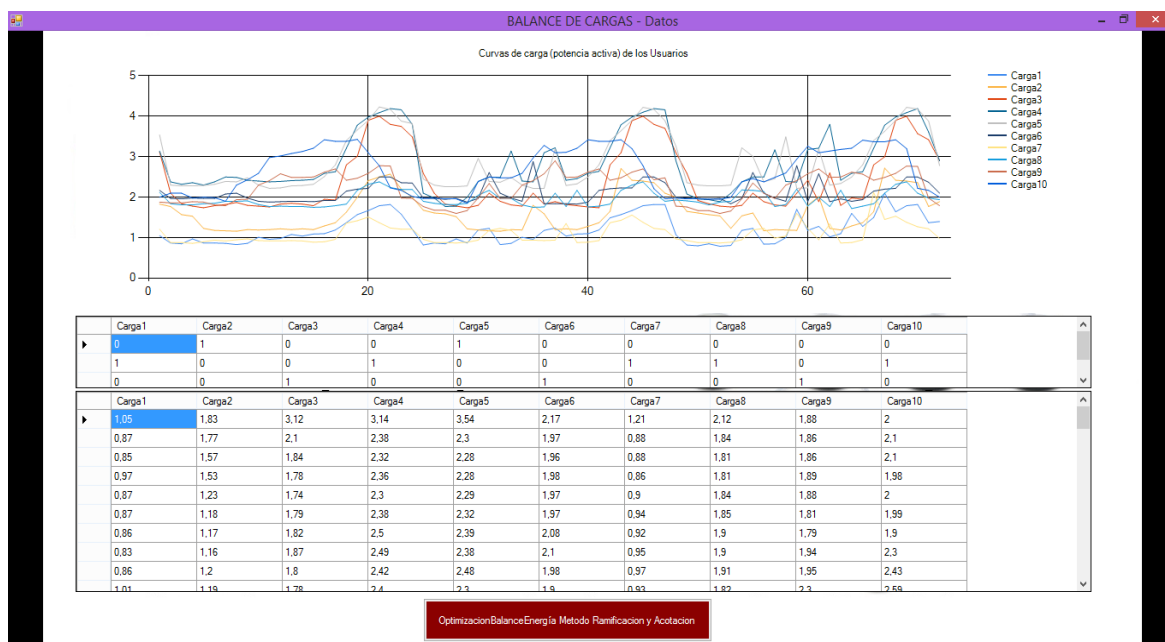


Figura A 16: Ejemplo de presentación de la información inicial cargada desde el origen de datos.

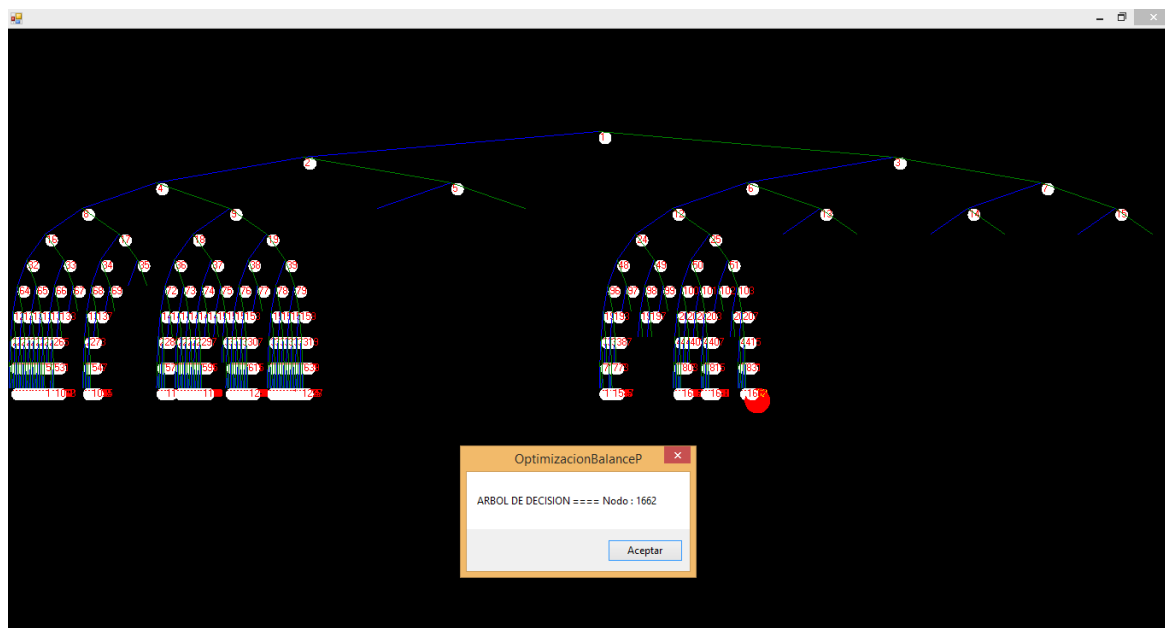


Figura A 17: Ejemplo de árbol de decisión generado por la aplicación Branch and Bound.

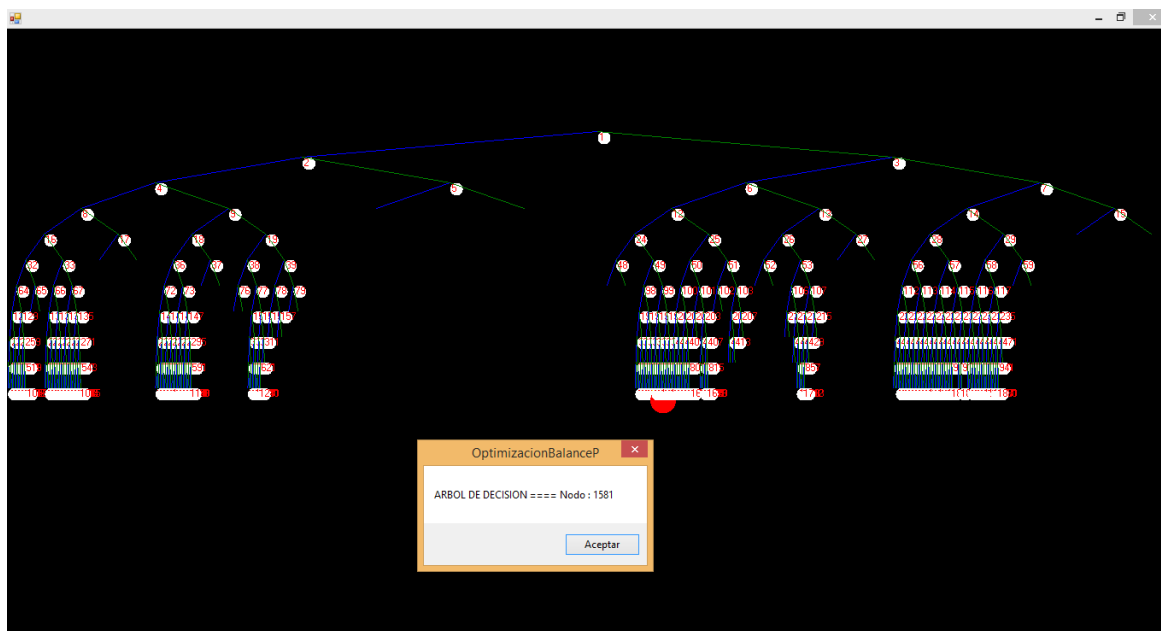


Figura A 18: Ejemplo de árbol de decisión generado por la aplicación Branch and Bound.

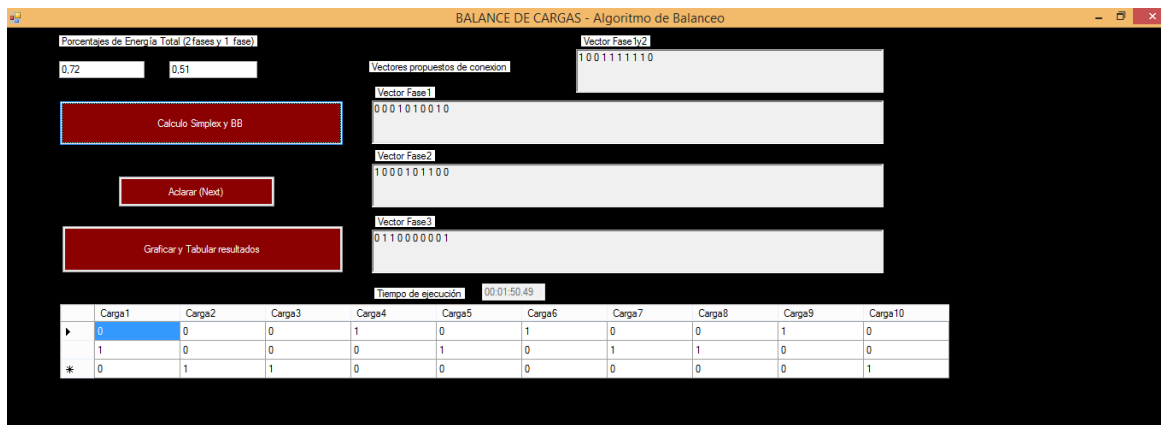


Figura A 19: Ejemplo de respuesta con matriz de conexiones balanceada.

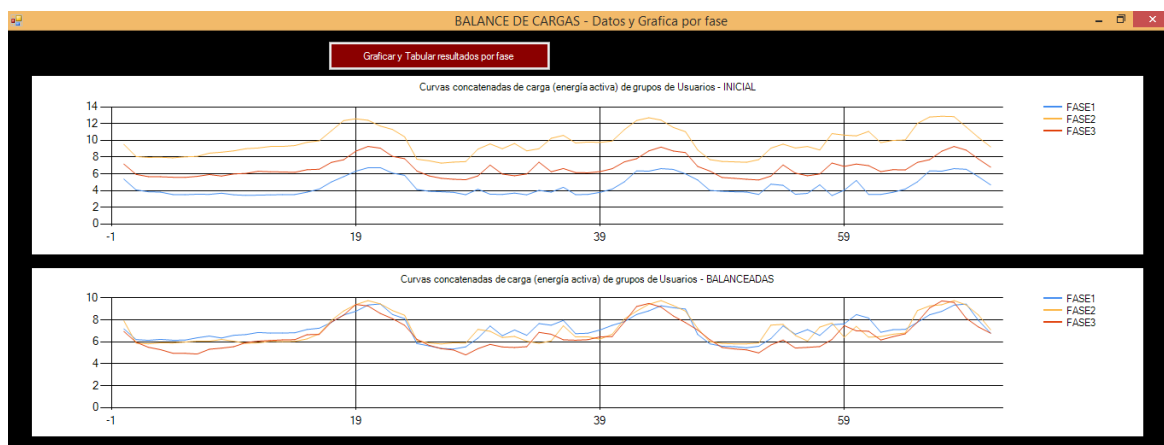


Figura A 20: Ejemplo de respuesta del balance de cargas. Curvas de demanda inicial y balanceada.

En las Figuras A21 y A22 se muestran los cálculos de los factores de pérdidas (fdp) para el nodo simulado de pruebas. Se tienen la matrices de conexión de cargas inicial, una matriz final y los factores de pérdidas inicial y finales.

factores de pérdidas iniciales - fdp				Max fdp
2,57%	11,82%	5,65%		11,82%

FASE	Carga1	Carga2	Carga3	Carga4	Carga5	Carga6	Carga7	Carga8	Carga9	Carga10
A	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
B	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1
C	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0

Figura A 21: Matriz inicial de conexiones y factor de pérdidas calculado para el caso base.

factores de pérdidas balanceados - fdp				Max fdp
7,34%	5,00%	6,12%	7,34%	7,34%
4,18%	5,79%	8,93%	8,93%	8,93%
7,49%	2,90%	8,93%	8,93%	8,93%
5,00%	7,96%	5,56%	7,96%	7,96%
6,12%	6,71%	5,56%	6,71%	6,71%
6,45%	6,32%	5,56%	6,45%	6,45%

FASE	Carga1	Carga2	Carga3	Carga4	Carga5	Carga6	Carga7	Carga8	Carga9	Carga10
A	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
B	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0
C	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1

Figura A 22: Matriz final de conexiones y factores de pérdidas calculados para el caso base con diferentes balanceos de carga. Se elige como mejor fdp=6,45%.

En el cálculo del fdp se utiliza la demanda máxima de la curva completa, es decir, la de la sumatoria de las demandas de las tres fases, para tener la misma referencia antes y después del proceso de balance.

En el laboratorio, para el caso de comunicación inalámbrica, se ejecutaron pruebas aisladas de conexión vía inalámbrica con medidores de energía Shark 100S y 200T, replicando las pruebas realizadas en [38], obteniendo los resultados de comunicación exitosos. Para la realización de pruebas prácticas reales de la aplicación se requiere de una cantidad mayor de medidores y cargas que las disponibles en laboratorio.

B. Anexo: Definición variables para algoritmo B&B.

Definición de variables para la función branch&bound:

- n : Número de variables de decisión, o cargas.
- m : Número de ecuaciones de restricción, o periodos de lectura de las cargas. Para el algoritmo programado, m debe ser mayor o igual que n ($m \geq n$).
- A : Matriz (m,n) de coeficientes de las variables en las ecuaciones de restricción. En este caso corresponde a los valores de la carga en cada periodo de lectura.
- B : Vector columna que corresponde a los recursos. Para el estudio corresponde a la sumatoria de las cargas, o carga total entregada a los usuarios en cada periodo de lectura.
- FO : Vector fila de los coeficientes de la función objetivo. Está compuesto de n unos negativos (-1), para la aplicación del método.
- Val : Variable para asignar viabilidad a cada nodo obtenido en el método (1 para soluciones viables binarias, 2 para soluciones viables no binarias a ramificar).

Inicialización de variables:

- Nodo_actual = {1}. Nodo con todas las soluciones.
- Nodos_padre = {2, 3}
- FO_mejor = -9999999999 (Se define como $-\infty$)
- J0 = Cálculo por método Simplex de la solución óptima para el Nodo 1. Corresponde a la solución del problema relajado (omitiendo la restricción de enteros-binarios).
- Cota Superior = Valor de la función objetivo calculada en J0. No debe haber soluciones mejores que esta (UpperBound).

Se dimensionan las matrices y vectores. En especial se mencionan los vectores de `Nodos_padre` y `Nodos_hijo` con 1000 posiciones, aunque en una enumeración completa deberían tener 2^n y 2^{n+1} posiciones respectivamente.

C.Anexo: Datos y resultados de simulación, 10 cargas, 72 periodos de tiempo. Balance de cargas B&B.

t	Carga1	Carga2	Carga3	Carga4	Carga5	Carga6	Carga7	Carga8	Carga9	Carga10
1	1,05	1,83	3,12	3,14	3,54	2,17	1,21	2,12	1,88	2,00
2	0,87	1,77	2,10	2,38	2,30	1,97	0,88	1,84	1,86	2,10
3	0,85	1,57	1,84	2,32	2,28	1,96	0,88	1,81	1,86	2,10
4	0,97	1,53	1,78	2,36	2,28	1,98	0,86	1,81	1,89	1,98
5	0,87	1,23	1,74	2,30	2,29	1,97	0,90	1,84	1,88	2,00
6	0,87	1,18	1,79	2,38	2,32	1,97	0,94	1,85	1,81	1,99
7	0,86	1,17	1,82	2,50	2,39	2,08	0,92	1,90	1,79	1,90
8	0,83	1,16	1,87	2,49	2,38	2,10	0,95	1,90	1,94	2,30
9	0,86	1,20	1,80	2,42	2,48	1,98	0,97	1,91	1,95	2,43
10	1,01	1,19	1,78	2,40	2,30	1,90	0,93	1,82	2,30	2,59
11	0,96	1,20	1,76	2,38	2,22	1,88	0,92	1,77	2,41	2,98
12	0,98	1,22	1,83	2,39	2,23	1,89	0,92	1,78	2,58	3,02
13	1,08	1,20	1,85	2,41	2,28	1,90	0,93	1,77	2,49	3,08
14	1,04	1,22	1,83	2,42	2,29	1,90	0,92	1,77	2,49	3,13
15	1,09	1,20	1,79	2,44	2,32	1,89	0,89	1,75	2,50	3,21
16	1,10	1,29	1,95	2,59	2,51	1,92	0,90	1,76	2,62	3,42
17	1,19	1,37	1,93	2,63	2,80	1,92	0,96	1,79	2,70	3,38
18	1,37	1,63	2,80	3,21	3,40	2,15	1,36	1,83	2,42	3,38
19	1,57	2,00	3,01	3,78	3,66	2,20	1,42	2,17	2,47	3,43
20	1,67	2,41	3,90	3,98	3,90	2,22	1,51	2,32	2,59	3,10
21	1,79	2,50	4,00	4,09	4,23	2,50	1,37	2,38	2,78	2,78
22	1,82	2,57	3,80	4,19	4,17	2,50	1,24	2,24	2,77	2,23
23	1,58	2,20	3,75	4,16	3,88	2,36	1,21	2,19	1,98	2,17
24	1,21	2,00	3,49	3,80	3,82	2,35	1,21	2,19	1,97	2,02
25	0,82	1,68	2,59	2,10	2,45	1,98	0,96	1,90	1,77	1,97
26	0,87	1,61	2,10	1,98	2,30	1,97	0,88	1,85	1,68	1,98
27	0,85	1,59	1,83	1,77	2,26	1,95	0,88	1,82	1,68	1,96
28	0,97	1,52	1,78	1,78	2,26	1,97	0,87	1,82	1,60	1,96
29	0,87	1,22	1,74	2,00	2,28	1,88	0,89	1,85	1,67	1,85
30	1,19	1,19	1,80	2,39	2,96	1,97	0,94	2,05	1,98	2,39
31	1,23	1,17	2,10	2,50	2,39	2,61	1,18	2,17	2,34	2,50
32	0,83	1,16	1,90	2,49	2,37	2,10	1,23	1,97	1,97	2,48
33	0,86	1,20	1,81	3,14	2,49	1,98	1,18	1,97	1,97	2,48
34	1,01	1,19	1,78	2,40	2,30	1,90	0,94	1,81	2,30	2,59
35	0,96	1,80	2,10	2,38	2,22	2,88	0,94	1,75	2,41	2,97
36	1,18	1,59	1,83	3,10	2,22	1,84	0,93	1,76	2,58	3,28

t	Carga1	Carga2	Carga3	Carga4	Carga5	Carga6	Carga7	Carga8	Carga9	Carga10
37	1,24	1,20	1,89	3,22	3,19	1,84	0,94	2,10	2,90	3,10
38	1,04	1,22	1,82	2,42	2,29	1,84	1,35	1,77	2,49	3,11
39	1,09	1,20	1,79	2,46	2,33	1,83	0,88	2,17	2,50	3,21
40	1,10	1,28	1,76	2,59	2,50	1,88	0,89	1,76	2,62	3,42
41	1,19	1,37	1,74	2,64	2,80	2,17	0,93	1,78	2,70	3,38
42	1,49	1,65	2,80	3,22	3,40	2,21	1,37	1,83	2,42	3,38
43	1,57	2,71	3,10	3,79	3,64	2,23	1,43	2,17	2,48	3,42
44	1,67	2,42	3,89	3,98	3,90	2,23	1,56	2,30	2,62	3,20
45	1,79	2,40	4,00	4,10	4,22	2,50	1,38	2,38	2,70	2,78
46	1,82	2,36	3,80	4,19	4,17	2,50	1,23	2,10	2,43	2,21
47	1,82	2,10	3,70	4,16	3,89	2,36	1,20	1,90	2,48	1,96
48	1,07	2,00	3,10	2,90	3,26	2,00	0,97	1,93	1,78	1,98
49	0,82	1,65	2,59	2,08	2,36	1,98	0,93	1,91	1,76	1,96
50	0,80	1,61	1,92	1,96	2,30	1,97	0,88	1,88	1,67	1,96
51	0,85	1,57	1,84	1,94	2,28	1,95	0,88	1,81	1,67	1,95
52	0,79	1,54	1,78	1,89	2,28	1,97	0,87	1,88	1,60	1,95
53	0,81	1,23	1,76	2,10	2,30	1,84	0,89	1,90	1,66	2,00
54	1,18	1,54	1,80	2,38	3,22	1,97	0,95	2,18	1,96	2,38
55	1,23	1,61	2,10	2,50	3,01	2,61	1,19	2,17	2,35	2,46
56	0,84	1,17	1,89	2,50	2,38	2,10	1,23	2,14	2,10	2,38
57	0,85	1,20	1,81	3,17	2,46	1,98	0,99	1,77	1,97	2,49
58	1,00	1,19	1,78	2,39	3,49	1,90	1,04	1,82	2,30	2,60
59	1,70	1,18	2,10	2,37	2,22	2,78	1,60	2,20	2,41	2,94
60	1,18	1,80	2,42	3,18	2,23	1,89	1,23	1,78	2,58	3,26
61	1,28	2,02	1,89	3,21	3,19	2,58	0,95	2,00	2,70	3,10
62	1,02	1,23	2,60	3,80	2,30	1,89	1,34	1,77	2,49	3,14
63	1,10	1,19	1,80	2,42	2,34	1,96	0,87	2,17	2,50	3,18
64	1,60	1,29	1,98	2,59	2,50	1,90	0,88	1,72	2,62	3,21
65	1,28	1,37	1,95	2,63	2,80	1,94	0,95	1,78	2,57	3,41
66	1,50	1,64	2,80	3,21	3,40	2,15	2,12	1,84	2,42	3,37
67	2,10	2,72	3,00	3,78	3,63	2,20	1,45	2,10	2,49	3,37
68	1,64	2,42	3,90	3,98	3,90	2,22	1,53	2,32	2,59	3,42
69	1,79	2,40	4,00	4,09	4,22	2,50	1,38	2,38	2,77	3,20
70	1,82	2,36	3,57	4,19	4,18	2,50	1,27	2,10	2,76	2,22
71	1,37	1,77	3,42	3,61	3,88	2,37	1,22	1,98	1,98	2,17
72	1,40	1,89	2,90	2,90	2,78	2,10	0,98	1,94	1,79	2,00

Tabla C-1: Datos base para la aplicación.

FASE	Carga1	Carga2	Carga3	Carga4	Carga5	Carga6	Carga7	Carga8	Carga9	Carga10
A	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
B	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1
C	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0

FASE	Carga1	Carga2	Carga3	Carga4	Carga5	Carga6	Carga7	Carga8	Carga9	Carga10
A	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0
B	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
C	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0

BALANCE DE CARGAS - Algoritmo de Balanceo

0.4 0.67

Calculo Simplex y BB

Graficar y Tabular resultados

Vectores propuestos de conexión

Vector Fase 1
0010001110

Vector Fase 2
0100010001

Vector Fase 3
1001100000

	Carga1	Carga2	Carga3	Carga4	Carga5	Carga6	Carga7	Carga8	Carga9	Carga10
0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0
0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0

Figura C 23: Matrices de conexión inicial y final para el caso base. Presentación en la aplicación.

t	A	B	C	SUMA
1	5,3700	9,5200	7,1700	22,0600
2	4,0700	8,0700	5,9300	18,0700
3	3,8500	7,9600	5,6600	17,4700
4	3,8100	7,9800	5,6500	17,4400
5	3,5200	7,9100	5,5900	17,0200
6	3,5000	8,0300	5,5700	17,1000
7	3,5600	8,0800	5,6900	17,3300
8	3,5400	8,4700	5,9100	17,9200
9	3,6800	8,5900	5,7300	18,0000
10	3,4900	8,7500	5,9800	18,2200
11	3,4200	9,0100	6,0500	18,4800
12	3,4500	9,0900	6,3000	18,8400
13	3,4800	9,2700	6,2400	18,9900
14	3,5100	9,2800	6,2200	19,0100
15	3,5200	9,3800	6,1800	19,0800
16	3,8000	9,7700	6,4900	20,0600
17	4,1700	9,9500	6,5500	20,6700
18	5,0300	11,1500	7,3700	23,5500
19	5,6600	12,3700	7,6800	25,7100
20	6,3100	12,5800	8,7100	27,6000
21	6,7300	12,4100	9,2800	28,4200
22	6,7400	11,7200	9,0700	27,5300
23	6,0800	11,3100	8,0900	25,4800
24	5,8200	10,4300	7,8100	24,0600
25	4,1300	7,7500	6,3400	18,2200
26	3,9100	7,5600	5,7500	17,2200
27	3,8500	7,2800	5,4600	16,5900
28	3,7800	7,4000	5,3500	16,5300
29	3,5000	7,4600	5,2900	16,2500
30	4,1500	8,9600	5,7500	18,8600
31	3,5600	9,5800	7,0500	20,1900
32	3,5300	9,0000	5,9700	18,5000
33	3,6900	9,6300	5,7600	19,0800
34	3,4900	8,7500	5,9800	18,2200
35	4,0200	9,0000	7,3900	20,4100
36	3,8100	10,2500	6,2500	20,3100

t	A	B	C	SUMA
1	8,3300	6,0000	7,7300	22,0600
2	6,6800	5,8400	5,5500	18,0700
3	6,3900	5,6300	5,4500	17,4700
4	6,3400	5,4900	5,6100	17,4400
5	6,3600	5,2000	5,4600	17,0200
6	6,3900	5,1400	5,5700	17,1000
7	6,4300	5,1500	5,7500	17,3300
8	6,6600	5,5600	5,7000	17,9200
9	6,6300	5,6100	5,7600	18,0000
10	6,8300	5,6800	5,7100	18,2200
11	6,8600	6,0600	5,5600	18,4800
12	7,1100	6,1300	5,6000	18,8400
13	7,0400	6,1800	5,7700	18,9900
14	7,0100	6,2500	5,7500	19,0100
15	6,9300	6,3000	5,8500	19,0800
16	7,2300	6,6300	6,2000	20,0600
17	7,3800	6,6700	6,6200	20,6700
18	8,4100	7,1600	7,9800	23,5500
19	9,0700	7,6300	9,0100	25,7100
20	10,3200	7,7300	9,5500	27,6000
21	10,5300	7,7800	10,1100	28,4200
22	10,0500	7,3000	10,1800	27,5300
23	9,1300	6,7300	9,6200	25,4800
24	8,8600	6,3700	8,8300	24,0600
25	7,2200	5,6300	5,3700	18,2200
26	6,5100	5,5600	5,1500	17,2200
27	6,2100	5,5000	4,8800	16,5900
28	6,0700	5,4500	5,0100	16,5300
29	6,1500	4,9500	5,1500	16,2500
30	6,7700	5,5500	6,5400	18,8600
31	7,7900	6,2800	6,1200	20,1900
32	7,0700	5,7400	5,6900	18,5000
33	6,9300	5,6600	6,4900	19,0800
34	6,8300	5,6800	5,7100	18,2200
35	7,2000	7,6500	5,5600	20,4100
36	7,1000	6,7100	6,5000	20,3100

t	A	B	C	SUMA
37	4,3900	10,6000	6,6300	21,6200
38	3,5100	9,6900	6,1500	19,3500
39	3,5300	9,8100	6,1200	19,4600
40	3,7800	9,7600	6,2600	19,8000
41	4,1700	9,9200	6,6100	20,7000
42	5,0500	11,2900	7,4300	23,7700
43	6,3500	12,3800	7,8100	26,5400
44	6,3200	12,7100	8,7400	27,7700
45	6,6200	12,4300	9,2000	28,2500
46	6,5300	11,5500	8,7300	26,8100
47	5,9900	11,0400	8,5400	25,5700
48	5,2600	8,8500	6,8800	20,9900
49	4,0100	7,7000	6,3300	18,0400
50	3,9100	7,4800	5,5600	16,9500
51	3,8500	7,4300	5,4600	16,7400
52	3,8200	7,3800	5,3500	16,5500
53	3,5300	7,7000	5,2600	16,4900
54	4,7600	9,0700	5,7300	19,5600
55	4,6200	9,5500	7,0600	21,2300
56	3,5500	9,0900	6,0900	18,7300
57	3,6600	9,2700	5,7600	18,6900
58	4,6800	8,8500	5,9800	19,5100
59	3,4000	10,8100	7,2900	21,5000
60	4,0300	10,6300	6,8900	21,5500
61	5,2100	10,5400	7,1700	22,9200
62	3,5300	11,0700	6,9800	21,5800
63	3,5300	9,7400	6,2600	19,5300
64	3,7900	10,0000	6,5000	20,2900
65	4,1700	10,0500	6,4600	20,6800
66	5,0400	12,0400	7,3700	24,4500
67	6,3500	12,8000	7,6900	26,8400
68	6,3200	12,8900	8,7100	27,9200
69	6,6200	12,8400	9,2700	28,7300
70	6,5400	11,6000	8,8300	26,9700
71	5,6500	10,3500	7,7700	23,7700
72	4,6700	9,2200	6,7900	20,6800
	322,2700	701,8300	484,9200	1509,0200
POTENCIAS INICIAL				

t	A	B	C	SUMA
37	7,8300	6,1400	7,6500	21,6200
38	7,4300	6,1700	5,7500	19,3500
39	7,3400	6,2400	5,8800	19,4600
40	7,0300	6,5800	6,1900	19,8000
41	7,1500	6,9200	6,6300	20,7000
42	8,4200	7,2400	8,1100	23,7700
43	9,1800	8,3600	9,0000	26,5400
44	10,3700	7,8500	9,5500	27,7700
45	10,4600	7,6800	10,1100	28,2500
46	9,5600	7,0700	10,1800	26,8100
47	9,2800	6,4200	9,8700	25,5700
48	7,7800	5,9800	7,2300	20,9900
49	7,1900	5,5900	5,2600	18,0400
50	6,3500	5,5400	5,0600	16,9500
51	6,2000	5,4700	5,0700	16,7400
52	6,1300	5,4600	4,9600	16,5500
53	6,2100	5,0700	5,2100	16,4900
54	6,8900	5,8900	6,7800	19,5600
55	7,8100	6,6800	6,7400	21,2300
56	7,3600	5,6500	5,7200	18,7300
57	6,5400	5,6700	6,4800	18,6900
58	6,9400	5,6900	6,8800	19,5100
59	8,3100	6,9000	6,2900	21,5000
60	8,0100	6,9500	6,5900	21,5500
61	7,5400	7,7000	7,6800	22,9200
62	8,2000	6,2600	7,1200	21,5800
63	7,3400	6,3300	5,8600	19,5300
64	7,2000	6,4000	6,6900	20,2900
65	7,2500	6,7200	6,7100	20,6800
66	9,1800	7,1600	8,1100	24,4500
67	9,0400	8,2900	9,5100	26,8400
68	10,3400	8,0600	9,5200	27,9200
69	10,5300	8,1000	10,1000	28,7300
70	9,7000	7,0800	10,1900	26,9700
71	8,6000	6,3100	8,8600	23,7700
72	7,6100	5,9900	7,0800	20,6800
	553,1200	458,1900	497,7100	1509,0200
POTENCIAS BALANCEADO				

Tabla C-2: Datos de simulación de cargas para el caso base, antes y después del balance de cargas.

D. Anexo: Datos y resultados de Diseño de experimentos

Número de cargas simuladas	Periodos de tiempo (horas)	Algoritmo implementado	Tiempo de ejecución (segundos)	% desbalance Fase A	% desbalance Fase B	% desbalance Fase C
10	1	Fuerza Bruta	6,03	0,00%	0,00%	0,00%
10	1	Fuerza Bruta	6,04	0,35%	0,35%	0,70%
10	1	Fuerza Bruta	6,27	0,00%	0,00%	0,00%
10	1	Fuerza Bruta	6,17	0,28%	0,28%	0,57%
10	1	Fuerza Bruta	6,09	0,27%	0,27%	0,54%
10	1	Fuerza Bruta	6,10	0,31%	0,31%	0,63%
10	1	Fuerza Bruta	6,03	0,00%	0,00%	0,00%
10	1	Fuerza Bruta	6,02	0,39%	0,39%	0,79%
10	1	Fuerza Bruta	5,10	0,23%	0,23%	0,45%
10	1	Fuerza Bruta	32,91	0,00%	0,00%	0,00%
10	1	Secuenciación	0,02	0,00%	0,92%	0,93%
10	1	Secuenciación	0,02	0,70%	2,46%	1,75%
10	1	Secuenciación	0,02	1,71%	0,85%	0,85%
10	1	Secuenciación	0,02	3,11%	1,13%	1,97%
10	1	Secuenciación	0,02	0,27%	2,15%	1,88%
10	1	Secuenciación	0,02	1,58%	0,31%	1,25%
10	1	Secuenciación	0,02	1,91%	0,96%	2,85%
10	1	Secuenciación	0,02	0,79%	0,39%	0,39%
10	1	Secuenciación	0,02	0,23%	1,14%	0,92%
10	1	Secuenciación	0,02	0,00%	0,00%	0,00%
10	1	Knapsack	0,09	0,00%	0,93%	0,93%
10	1	Knapsack	0,02	0,70%	0,70%	1,40%
10	1	Knapsack	0,02	1,70%	0,86%	0,86%
10	1	Knapsack	0,02	0,28%	0,28%	0,57%
10	1	Knapsack	0,02	2,68%	2,68%	5,38%
10	1	Knapsack	0,02	0,31%	2,20%	2,52%
10	1	Knapsack	0,02	0,95%	0,00%	0,96%
10	1	Knapsack	0,02	2,74%	1,57%	4,32%
10	1	Knapsack	0,02	0,45%	1,82%	2,27%
10	1	Knapsack	0,02	5,07%	3,63%	1,45%

Número de cargas simuladas	Periodos de tiempo (horas)	Algoritmo implementado	Tiempo de ejecución (minutos)	Tiempo de ejecución (segundos)	% desbalance Fase A	% desbalance Fase B	% desbalance Fase C
14	1	Fuerza Bruta	5	3,75	0,00%	0,00%	0,00%
14	1	Fuerza Bruta	5	0,19	0,00%	0,00%	0,00%
14	1	Fuerza Bruta	5	0,42	0,00%	0,00%	0,00%
14	1	Fuerza Bruta	4	58,71	0,00%	0,00%	0,00%
14	1	Fuerza Bruta	5	4,36	0,22%	0,22%	0,45%
14	1	Fuerza Bruta	5	2,21	0,22%	0,22%	0,44%
14	1	Fuerza Bruta	5	2,33	0,18%	0,18%	0,34%
14	1	Fuerza Bruta	5	0,84	0,21%	0,21%	0,43%
14	1	Fuerza Bruta	5	5,91	0,33%	0,33%	0,67%
14	1	Fuerza Bruta	5	4,89	0,00%	0,00%	0,00%
14	1	Secuenciación	0	0,03	0,00%	0,00%	0,00%
14	1	Secuenciación	0	0,03	1,36%	1,36%	0,00%
14	1	Secuenciación	0	0,03	1,17%	0,59%	0,59%
14	1	Secuenciación	0	0,03	1,15%	0,58%	1,72%
14	1	Secuenciación	0	0,03	0,45%	0,22%	0,22%
14	1	Secuenciación	0	0,03	0,88%	0,88%	1,75%
14	1	Secuenciación	0	0,04	0,18%	0,34%	0,18%
14	1	Secuenciación	0	0,03	1,06%	1,06%	2,12%
14	1	Secuenciación	0	0,03	0,67%	0,67%	1,33%
14	1	Secuenciación	0	0,03	1,96%	0,65%	1,30%
14	1	Knapsack	0	0,03	1,42%	0,71%	0,71%
14	1	Knapsack	0	0,03	1,36%	2,04%	3,40%
14	1	Knapsack	0	0,03	1,17%	1,17%	0,00%
14	1	Knapsack	0	0,03	0,00%	0,00%	0,00%
14	1	Knapsack	0	0,02	0,22%	2,25%	2,48%
14	1	Knapsack	0	0,02	1,09%	1,09%	2,20%
14	1	Knapsack	0	0,03	0,34%	1,89%	2,24%
14	1	Knapsack	0	0,02	0,21%	0,21%	0,43%
14	1	Knapsack	0	0,02	2,33%	0,67%	1,67%
14	1	Knapsack	0	0,02	0,65%	0,66%	0,00%

Número de cargas simuladas	Periodos de tiempo (horas)	Algoritmo implementado	Tiempo de ejecución (segundos)	% desbalance Fase A	% desbalance Fase B	% desbalance Fase C
18	1	Fuerza Bruta				
18	1	Fuerza Bruta				
18	1	Fuerza Bruta				
18	1	Fuerza Bruta				
18	1	Fuerza Bruta				
18	1	Fuerza Bruta				
18	1	Fuerza Bruta				
18	1	Fuerza Bruta				
18	1	Fuerza Bruta				
18	1	Fuerza Bruta				
18	1	Fuerza Bruta				
18	1	Secuenciación	0,04	0,28%	0,14%	0,14%
18	1	Secuenciación	0,03	0,83%	0,41%	0,41%
18	1	Secuenciación	0,04	0,53%	0,53%	1,05%
18	1	Secuenciación	0,03	0,80%	0,39%	0,39%
18	1	Secuenciación	0,04	1,43%	0,58%	2,00%
18	1	Secuenciación	0,04	0,41%	0,41%	0,82%
18	1	Secuenciación	0,04	2,00%	0,37%	2,35%
18	1	Secuenciación	0,03	0,98%	0,25%	1,21%
18	1	Secuenciación	0,03	0,35%	0,35%	0,00%
18	1	Secuenciación	0,04	0,31%	0,15%	0,15%
18	1	Knapsack	0,03	0,56%	0,28%	0,28%
18	1	Knapsack	0,03	1,03%	0,41%	1,45%
18	1	Knapsack	0,03	1,44%	0,53%	0,92%
18	1	Knapsack	0,03	0,00%	0,00%	0,00%
18	1	Knapsack	0,03	1,14%	0,15%	1,00%
18	1	Knapsack	0,03	0,41%	2,05%	2,47%
18	1	Knapsack	0,03	0,18%	0,18%	0,37%
18	1	Knapsack	0,03	0,48%	0,48%	0,98%
18	1	Knapsack	0,05	0,70%	2,10%	2,81%
18	1	Knapsack	0,03	0,15%	0,15%	0,31%

Número de cargas simuladas	Periodos de tiempo (horas)	Algoritmo implementado	Tiempo de ejecución (minutos)	Tiempo de ejecución (segundos)	Factor de pérdidas inicial máximo	Factor de pérdidas balanceado máximo
10	24	Branch and Bound	0	4,64	11,76%	7,27%
10	24	Branch and Bound	0	2,59	13,14%	15,89%
10	24	Branch and Bound	0	0,89	12,14%	8,36%
10	24	Branch and Bound	0	1,65	10,53%	12,80%
10	24	Branch and Bound	0	1,89	12,13%	7,70%
10	24	Branch and Bound	0	1,79	12,42%	7,52%
10	24	Branch and Bound	0	0,82	12,17%	6,78%
10	24	Branch and Bound	0	2,18	11,10%	8,00%
10	24	Branch and Bound	0	3,32	13,93%	8,93%
10	24	Branch and Bound	0	1,49	10,39%	7,26%
10	72	Branch and Bound	0	15,28	11,82%	6,44%
10	72	Branch and Bound	0	3,10	11,05%	6,66%
10	72	Branch and Bound	0	4,70	11,52%	8,39%
10	72	Branch and Bound	0	8,55	10,37%	6,90%
10	72	Branch and Bound	0	3,36	11,31%	8,62%
10	72	Branch and Bound	0	6,67	11,42%	9,20%
10	72	Branch and Bound	0	6,27	11,90%	9,38%
10	72	Branch and Bound	0	9,22	9,75%	5,54%
10	72	Branch and Bound	0	6,30	12,11%	12,05%
10	72	Branch and Bound	0	4,41	9,24%	5,32%

Número de cargas simuladas	Periodos de tiempo (horas)	Algoritmo implementado	Tiempo de ejecución (minutos)	Tiempo de ejecución (segundos)	Factor de pérdidas inicial máximo	Factor de pérdidas balanceado máximo
14	24	Branch and Bound	0	26,24	12,60%	7,68%
14	24	Branch and Bound	0	2,17	12,48%	14,76%
14	24	Branch and Bound	0	11,19	12,36%	7,25%
14	24	Branch and Bound	0	1,37	13,67%	21,32%
14	24	Branch and Bound	0	5,62	12,24%	11,02%
14	24	Branch and Bound	0	4,56	13,82%	9,55%
14	24	Branch and Bound	0	49,06	12,70%	8,11%
14	24	Branch and Bound	0	11,50	11,81%	7,56%
14	24	Branch and Bound	0	3,76	15,29%	14,09%
14	24	Branch and Bound	0	2,37	13,47%	11,57%
14	72	Branch and Bound	0	16,20	12,50%	9,90%
14	72	Branch and Bound	0	6,27	11,70%	12,21%
14	72	Branch and Bound	0	8,49	12,25%	10,43%
14	72	Branch and Bound	0	7,11	13,18%	17,22%
14	72	Branch and Bound	0	20,37	11,97%	7,22%
14	72	Branch and Bound	0	14,76	13,06%	10,47%
14	72	Branch and Bound	0	16,07	11,90%	6,53%
14	72	Branch and Bound	0	9,84	10,30%	7,52%
14	72	Branch and Bound	0	6,35	14,18%	18,27%
14	72	Branch and Bound	0	9,37	11,76%	11,42%

Número de cargas simuladas	Periodos de tiempo (horas)	Algoritmo implementado	Tiempo de ejecución (minutos)	Tiempo de ejecución (segundos)	Factor de pérdidas inicial máximo	Factor de pérdidas balanceado máximo
18	24	Branch and Bound	0	22,48	12,15%	11,84%
18	24	Branch and Bound	0	10,72	12,35%	9,55%
18	24	Branch and Bound	0	31,99	12,08%	9,06%
18	24	Branch and Bound	0	12,30	12,53%	8,58%
18	24	Branch and Bound	0	12,63	12,32%	10,03%
18	24	Branch and Bound	0	51,23	15,45%	9,25%
18	24	Branch and Bound	1	26,18	15,45%	7,20%
18	24	Branch and Bound	3	26,40	14,25%	8,95%
18	24	Branch and Bound	1	17,36	14,60%	8,77%
18	24	Branch and Bound	0	8,50	13,83%	13,69%
18	72	Branch and Bound	0	34,19	11,98%	9,82%
18	72	Branch and Bound	0	30,56	12,00%	10,29%
18	72	Branch and Bound	0	20,04	12,15%	15,97%
18	72	Branch and Bound	1	8,20	12,23%	8,97%
18	72	Branch and Bound	0	45,75	11,57%	8,15%
18	72	Branch and Bound	0	24,56	14,95%	13,55%
18	72	Branch and Bound	0	10,52	12,29%	16,42%
18	72	Branch and Bound	1	5,49	13,94%	8,40%
18	72	Branch and Bound	0	26,39	14,91%	9,09%
18	72	Branch and Bound	0	32,21	14,79%	12,04%

Tablas D-3: Diseño de experimentos para 10, 14 y 18 cargas.

E. Anexo: Datos y resultados de pruebas de laboratorio

Se realizan simulaciones de un nodo con 9 cargas con 20 periodos de tiempo con el algoritmo implementado. Posteriormente se realizan pruebas en el laboratorio. En la Tabla D-4 se muestra la asignación de los taps de las resistencias variables para la realización de las pruebas.

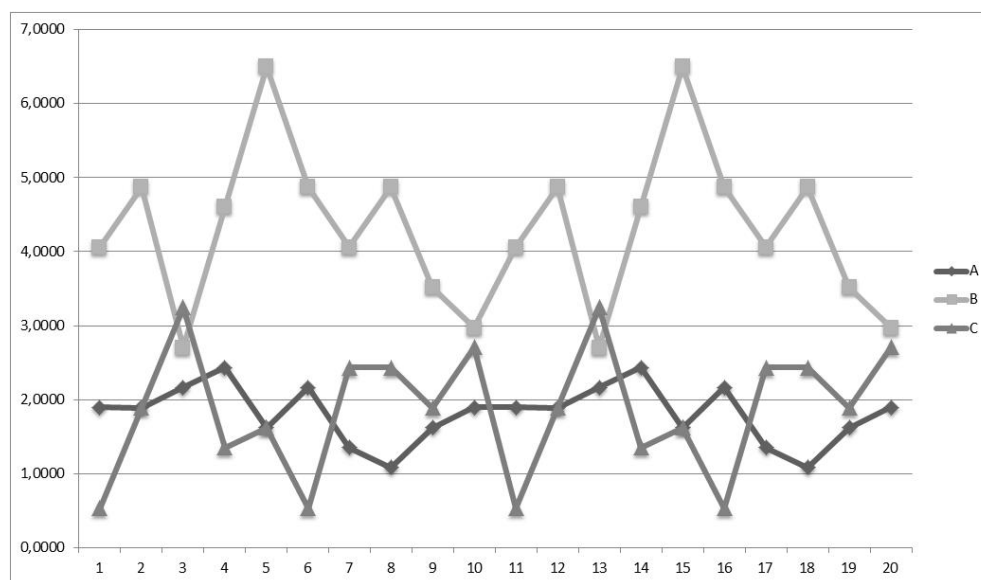
	Carga1		Carga2		Carga3		Carga4		Carga5		Carga6		Carga7		Carga8		Carga9	
	A	TAP	B	TAP	A	TAP	A	TAP	B	TAP	C	TAP	A	TAP	A	TAP	C	TAP
Tiempo1	0,8125	3	1,6250	6	0,2686	1	1,0833	4	0,2686	1	0,2686	1	0,8125	3	1,0833	4	0,2686	1
Tiempo2	0,2686	1	1,3542	5	1,6250	6	0,2686	1	1,3542	5	0,5417	2	1,6250	6	1,3542	5	0,2686	1
Tiempo3	0,2686	1	0,5417	2	1,6250	6	0,8125	3	0,5417	2	0,2686	1	1,3542	5	1,0833	4	1,6250	6
Tiempo4	1,6250	6	0,5417	2	0,2686	1	1,3542	5	0,5417	2	0,5417	2	1,0833	4	1,3542	5	1,0833	4
Tiempo5	1,3542	5	1,3542	5	0,2686	1	1,3542	5	0,8125	3	1,6250	6	0,2686	1	1,3542	5	1,3542	5
Tiempo6	1,6250	6	0,5417	2	0,2686	1	1,0833	4	1,0833	4	0,5417	2	1,0833	4	1,0833	4	0,2686	1
Tiempo7	1,3542	5	0,5417	2	1,6250	6	0,8125	3	1,6250	6	0,2686	1	0,5417	2	0,2686	1	0,8125	3
Tiempo8	0,2686	1	1,3542	5	1,6250	6	0,5417	2	1,3542	5	1,6250	6	0,5417	2	0,2686	1	0,8125	3
Tiempo9	0,2686	1	0,5417	2	1,6250	6	0,8125	3	1,0833	4	1,0833	4	0,8125	3	0,5417	2	0,2686	1
Tiempo10	0,5417	2	0,5417	2	1,6250	6	1,0833	4	1,3542	5	0,2686	1	0,8125	3	0,2686	1	1,0833	4
Tiempo11	0,2686	1	1,3542	5	0,2686	1	0,5417	2	1,0833	4	0,5417	2	0,5417	2	1,0833	4	0,2686	1
Tiempo12	1,0833	4	0,2686	1	1,0833	4	1,3542	5	0,5417	2	0,2686	1	0,8125	3	1,3542	5	0,5417	2
Tiempo13	1,6250	6	1,3542	5	0,5417	2	0,8125	3	1,0833	4	1,3542	5	1,0833	4	1,3542	5	0,2686	1
Tiempo14	0,5417	2	1,3542	5	1,3542	5	1,6250	6	1,0833	4	1,6250	6	0,2686	1	0,2686	1	1,3417	4
Tiempo15	1,6250	6	1,0833	4	0,5417	2	0,2686	1	0,8125	3	0,5417	2	0,2686	1	0,5417	2	0,2686	1
Tiempo16	0,2686	1	0,5417	2	1,6250	6	1,6250	6	1,3542	5	1,0833	4	0,2686	1	0,8125	3	1,3417	4
Tiempo17	0,5417	2	0,2686	1	0,2686	1	0,5417	2	0,8125	3	0,2686	1	1,3542	5	1,3542	5	0,2686	1
Tiempo18	1,0833	4	0,8125	3	1,3542	5	0,8125	3	1,6250	6	1,0833	4	1,6250	6	1,0833	4	1,6250	6
Tiempo19	1,6250	6	1,3542	5	0,5417	2	1,3542	5	1,3542	5	1,3542	5	1,0833	4	0,8125	3	1,0833	4
Tiempo20	0,5417	2	0,8125	3	1,0833	4	0,8125	3	1,0833	4	0,2686	1	0,2686	1	0,5417	2	0,2686	1
Tiempo21	0,8125	3	1,3542	5	1,6250	6	1,6250	6	1,3542	5	1,6250	6	0,5417	2	0,2686	1	0,2686	1
Tiempo22	0,2686	1	0,5417	2	1,3542	5	0,5417	2	1,3542	5	1,0833	4	0,8125	3	1,3417	4	1,3417	4
Tiempo23	0,8125	3	0,5417	2	1,0833	4	1,6250	6	0,5417	2	0,5417	2	0,2686	1	0,8125	3	1,3417	4
Tiempo24	0,5417	2	0,8125	3	0,8125	3	1,6250	6	0,8125	3	1,0833	4	0,5417	2	0,5417	2	0,8125	3

Tabla E-4: Asignación de taps de resistencias variables para el caso de laboratorio – 9 cargas.

Los siguientes datos corresponden a las simulaciones, para la conexión inicial, y posteriormente para la conexión balanceada propuesta.

Matriz de conexión - Inicial									
Fase	Carga1	Carga2	Carga3	Carga4	Carga5	Carga6	Carga7	Carga8	Carga9
A	0	0	0	1	0	0	1	0	0
B	1	1	0	0	1	1	0	1	0
C	0	0	1	0	0	0	0	0	1

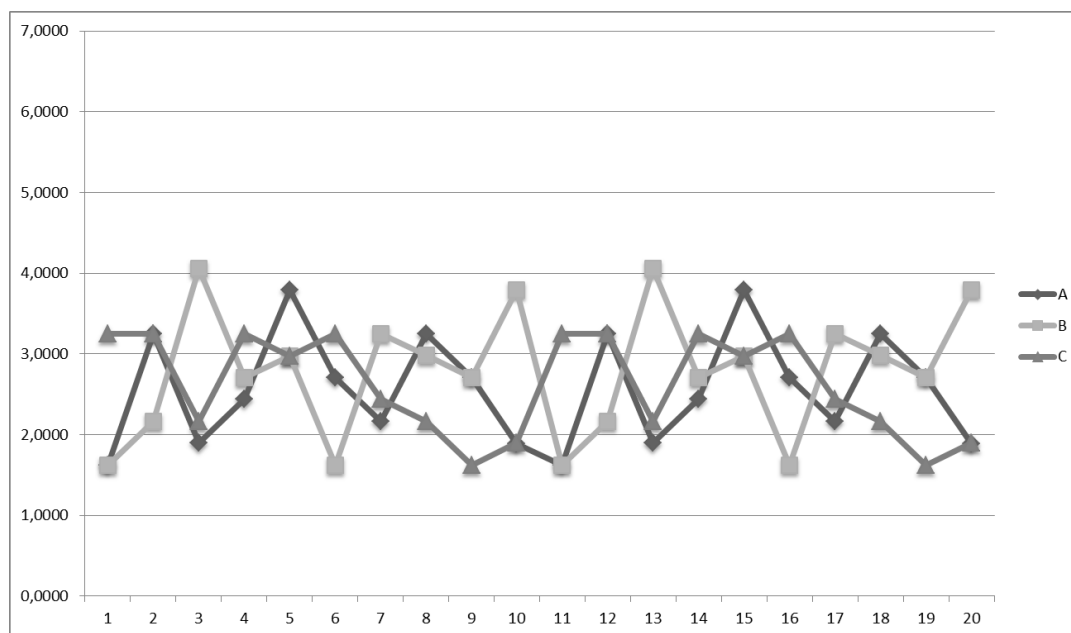
A	B	C	SUMA
1,8958	4,0580	0,5372	6,4910
1,8936	4,8728	1,8936	8,6600
2,1667	2,7039	3,2500	8,1205
2,4375	4,6042	1,3519	8,3936
1,6228	6,5000	1,6228	9,7455
2,1667	4,8750	0,5372	7,5789
1,3542	4,0580	2,4375	7,8497
1,0833	4,8705	2,4375	8,3914
1,6250	3,5186	1,8936	7,0372
1,8958	2,9747	2,7083	7,5789
1,8958	4,0580	0,5372	6,4910
1,8936	4,8728	1,8936	8,6600
2,1667	2,7039	3,2500	8,1205
2,4375	4,6042	1,3519	8,3936
1,6228	6,5000	1,6228	9,7455
2,1667	4,8750	0,5372	7,5789
1,3542	4,0580	2,4375	7,8497
1,0833	4,8705	2,4375	8,3914
1,6250	3,5186	1,8936	7,0372
1,8958	2,9747	2,7083	7,5789
36,2827	86,0713	37,3392	159,6932
POTENCIAS (corriente) INICIAL			



Figuras E 24: Matriz de conexión inicial, cuadro de demandas y curvas de demanda para el caso de laboratorio – 9 cargas.

Matriz de conexión - Balanceada con algoritmo									
Fase	Carga1	Carga2	Carga3	Carga4	Carga5	Carga6	Carga7	Carga8	Carga9
A	0	0	0	0	1	1	0	1	0
B	0	0	1	1	0	0	0	0	1
C	1	1	0	0	0	0	1	0	0

A	B	C	SUMA
1,6205	1,6205	3,2500	6,4910
3,2500	2,1622	3,2478	8,6600
1,8936	4,0625	2,1644	8,1205
2,4375	2,7061	3,2500	8,3936
3,7917	2,9769	2,9769	9,7455
2,7083	1,6205	3,2500	7,5789
2,1622	3,2500	2,4375	7,8497
3,2478	2,9792	2,1644	8,3914
2,7083	2,7061	1,6228	7,0372
1,8914	3,7917	1,8958	7,5789
1,6205	1,6205	3,2500	6,4910
3,2500	2,1622	3,2478	8,6600
1,8936	4,0625	2,1644	8,1205
2,4375	2,7061	3,2500	8,3936
3,7917	2,9769	2,9769	9,7455
2,7083	1,6205	3,2500	7,5789
2,1622	3,2500	2,4375	7,8497
3,2478	2,9792	2,1644	8,3914
2,7083	2,7061	1,6228	7,0372
1,8914	3,7917	1,8958	7,5789
51,4225	55,7514	52,5193	159,6932
POTENCIAS (corriente) BALANCEADO			



Figuras E 25: Matriz de conexión inicial, cuadro de demandas y curvas de demanda para el caso de laboratorio – 9 cargas.

FASE A				FASE B				FASE C				TOTAL				
Calculado	Medido	Medido	Medido	Calculado	Medido	Medido	Medido	Calculado	Medido	Medido	Medido	Calculado	Medido	Medido	Medido	
A (W)	A (W)	A (TDH V)	A (TDH I)	B (W)	B (W)	B (TDH V)	B (TDH I)	C (W)		C (TDH V)	C (TDH I)	TOTAL (W)	TOTAL (W)	(TDH V)	(TDH I)	
1	135,1657	135	1,10%	1,00%	175,2376	174,3	1,20%	1,20%	101,79	101,2	1,00%	1,00%	412,1933	410,5	34,70%	3,00%
2	170,4085	168,6	1,10%	1,10%	285,383	280,9	1,30%	1,20%	136,37	134,5	1,10%	1,10%	592,1615	583,9	28,20%	2,30%
3	131,6388		1,10%	1,00%	156,009		1,30%	1,20%	245,1184		1,00%	0,90%	532,7662		32,10%	1,90%
4	223,436		1,00%	1,00%	175,467		1,20%	1,20%	164,8011		1,00%	1,00%	563,7041		52,20%	3,60%
5	224,9728		1,00%	1,00%	250,39		1,20%	1,20%	184,2484		1,00%	1,00%	659,6112		35,00%	5,00%
6	222,101	222,4	1,10%	1,00%	192,348	191,9	1,20%	1,20%	101,595	101,3	1,10%	1,00%	516,044	515,6	41,40%	1,80%
7	150,8156		1,20%	1,00%	172,529		1,20%	1,20%	197,9159		1,00%	1,00%	521,2605		34,00%	3,70%
8	168,2304	166,5	1,00%	1,00%	210,4668	209,2	1,20%	1,20%	183,5834	182	1,00%	1,00%	562,2806	557,7	33,00%	6,50%
9	150,8156	151,2	1,00%	1,00%	157,527	157,1	1,20%	1,20%	166,3317	167,2	1,00%	1,00%	474,6743	475,5	36,60%	7,10%
10	116,0764	115,2	1,00%	1,00%	156,0278	155,6	1,20%	1,20%	230,3818	229,4	1,00%	1,00%	502,486	500,3	31,90%	2,00%
11	149,445	151,5	1,10%	1,10%	116,9863	118,8	1,20%	1,20%	166,7882	168,2	1,00%	1,00%	433,2195	438,5	44,20%	2,90%
12	134,6112	133,8	1,10%	1,10%	158,5295	157,9	1,20%	1,20%	278,0505	274,2	1,00%	1,00%	571,1912	565,7	30,20%	1,60%
13	115,0172		1,10%	1,10%	213,762		1,20%	1,20%	214,656		1,00%	1,00%	543,4352		28,90%	2,20%
14	240,061		1,10%	1,00%	212,3517		1,20%	1,20%	120,2688		1,00%	1,00%	572,6815		43,60%	2,00%
15	241,56	241,5	1,10%	1,00%	267,5994	267	1,20%	1,20%	119,4264	119,4	1,00%	1,00%	628,5858	627,9	33,70%	1,80%
16	255,4911	256,3	1,10%	1,10%	137,1447	136,7	1,20%	1,20%	119,4912	118,8	1,00%	1,00%	512,127	511,7	63,40%	1,40%
17	255,0424	251,6	1,00%	1,00%	99,3808	98,6	1,20%	1,20%	167,04	165	1,00%	1,00%	521,4632	515,3	63,20%	1,30%
18	148,8676	147,6	1,00%	1,00%	192,2795	190,2	1,20%	1,20%	210,6456	210	0,90%	0,90%	551,7927	547,8	39,70%	3,30%
19	147,065	149,4	1,00%	1,00%	135,63	138	1,10%	1,10%	180,373	183,4	1,00%	1,00%	463,068	470,8	42,60%	3,00%
20	203,6485	205,2	1,00%	1,00%	118,4658	118,6	1,10%	1,10%	183,3291	184,2	1,00%	1,00%	505,4434	507	60,00%	1,90%

Tabla E-5: Datos de mediciones con el equipo Fluke 435 para el caso de laboratorio – 9 cargas.

POTENCIAS (corriente) TEÓRICAS				POTENCIAS (corriente) MEDIDAS					DIFERENCIA REAL/TEÓRICO			
A	B	C	TOTAL	A	B	C	NEUTRO	TOTAL	A	B	C	PROMEDIO
1,621	1,621	3,250	6,491	1,590	1,610	3,014	1,415	6,2140	1,88%	0,65%	7,26%	3,26%
3,250	2,162	3,248	8,660	3,179	2,156	2,992	0,973	8,3270	2,18%	0,29%	7,88%	3,45%
1,894	4,063	2,164	8,121	1,856	3,940	2,029	1,947	7,8250	1,99%	3,02%	6,26%	3,75%
2,438	2,706	3,250	8,394	2,394	2,654	3,021	0,557	8,0690	1,78%	1,93%	7,05%	3,59%
3,792	2,977	2,977	9,746	3,692	2,902	2,775	0,848	9,3690	2,63%	2,52%	6,78%	3,98%
2,708	1,621	3,250	7,579	2,670	1,609	3,028	1,291	7,3070	1,42%	0,71%	6,83%	2,99%
2,162	3,250	2,438	7,850	2,138	3,192	2,293	0,950	7,6230	1,12%	1,78%	5,93%	2,94%
3,248	2,979	2,164	8,391	3,162	2,940	2,024	1,022	8,1260	2,64%	1,31%	6,49%	3,48%
2,708	2,706	1,623	7,037	2,666	2,668	1,535	1,101	6,8690	1,56%	1,41%	5,41%	2,79%
1,891	3,792	1,896	7,579	1,868	3,664	1,795	1,791	7,3270	1,23%	3,37%	5,32%	3,31%

Tabla E-6: Datos de comparación de mediciones teóricas y de laboratorio para el caso de 9 cargas.



Figura E 26: Resultados de mediciones de corrientes con el equipo Fluke 435 para el caso de laboratorio – 9 cargas.

Bibliografía

- [1] Comité Directivo Colombia Inteligente, “Informe de Gestión 2013,” Bogotá, 2014.
- [2] J. See, W. Carr, and S. E. Collier, “Real Time Distribution Analysis for Electric Utilities,” *2008 IEEE Rural Electr. Power Conf.*, no. 08, pp. B5–B5–8, 2008.
- [3] C. H. D. C. S. A. E.S.P., “MANUAL DE NORMAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN - MACROMEDICIÓN,” Manizales, 2014.
- [4] J. F. A. M. Juan Carlos Aponte Gutiérrez, “Proyección de Demanda de Energía Eléctrica en Colombia,” *Unidad Planeación Min. Energética*, 2013.
- [5] P. M. Vasquez Granda, “Parametrización, control, determinación y reducción de pérdidas en sistemas de distribución,” 2014.
- [6] S. R. Castaño, *Redes de Distribución de Energía*, 3rd ed. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2004.
- [7] L. Berrio and C. Zuluaga, “Concepts, standards and communication technologies in smart grid,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, no. 3, pp. 1–6, 2012.
- [8] A. G. Peralta Sevilla and F. Amata Fernández, “Evolución de las Redes Eléctricas hacia Smart Grid en Países de la Región Andina,” *Rev. Educ. en Ing.*, vol. 8, pp. 1–14, 2013.
- [9] J. Carrión González, J. Cuenca Tinitana, and D. Orellana, “Balanceo de circuitos de distribución primaria,” *Rev. CEDAMAZ*, vol. 4, no. 1, pp. 91–96, 2014.
- [10] F. R. Quintela, J. M. G. Arévalo, and N. Melchor Redondo, “Desequilibrio y pérdidas en las instalaciones eléctricas,” 2011.
- [11] V. Begoña, “Programación matemática: Modelos de Optimización,” Madrid, 2010.
- [12] G. Jimenez Lozano, “Investigación Operativa I.” [Online]. Available: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4060014/index.html>.
- [13] B. H. Luis roberto and S. G. Raimundo Cláudio, “Balance de Cargas en Circuitos Secundarios de Distribución,” pp. 21–34, 2011.
- [14] R. Sedgewick, *Algoritmos en C++*. 1992.
- [15] N. Baquero, “Programación de Sistemas Productivos Secuenciación de Operaciones,” Caracas, 2006.
- [16] DECSAI, “Programación Dinámica.”
- [17] J. Campos, “Programación Dinámica,” pp. 1–105, 2010.

-
- [18] P. Simplex, "PHP Simplex: Optimizando recursos con Programación Lineal." [Online]. Available: <http://www.phpsimplex.com/index.htm>.
 - [19] Universidad Técnica Federico Santa María, "Fundamentos de Investigación de Operaciones 1 - Método Simplex," Valparaíso, 2004.
 - [20] J. F. Franco, M. J. Rider, M. Lavorato, and R. Romero, "Optimal Conductor Size Selection and Reconductoring in Radial Distribution Systems Using a Mixed-Integer LP Approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 10–20, 2013.
 - [21] A. B. Knolseisen, J. Coelho, S. F. Mayerle, F. J. S. Pimentel, and R. H. Guembarovski, "A model for the improvement of load balancing in secondary networks," *2003 IEEE Bol. PowerTech - Conf. Proc.*, vol. 3, no. Lv, pp. 822–828, 2003.
 - [22] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *Power Deliv. IEEE Trans.*, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1407, 1989.
 - [23] B. S. E. Ricci A. Vinerba, "Power-Grid Load Balancing by Using Smart Home Appliances," *IEEE Spectr.*, pp. 2008–2009, 2008.
 - [24] M. C. Vlot, J. D. Knigge, and J. G. HanSlootweg, "Economical regulation power through load shifting with smart energy appliances," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1705–1712, 2013.
 - [25] T. H. Chang, M. Alizadeh, and A. Scaglione, "Real-time power balancing via decentralized coordinated home energy scheduling," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1490–1504, 2013.
 - [26] N. Lu, "An evaluation of the HVAC load potential for providing load balancing service," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1263–1270, 2012.
 - [27] P. Yi, X. Dong, A. Iwayemi, C. Zhou, and S. Li, "Real-Time Opportunistic Scheduling for Residential Demand Response," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 227–234, 2013.
 - [28] S. Sun, M. Dong, and B. Liang, "Distributed Real-Time Power Balancing in Renewable-Integrated Power Grids With Storage and Flexible Loads," pp. 1–13, 2015.
 - [29] G. T. Costanzo, G. Zhu, M. F. Anjos, and G. Savard, "A system architecture for autonomous demand side load management in smart buildings," *IEEE Trans.*

- Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 2157–2165, 2012.
- [30] H. Shirzeh, F. Naghdy, P. Ciufo, and M. Ros, “Adaptive stochastic energy flow balancing in smart grid,” *2013 IEEE Energytech*, pp. 1–6, 2013.
- [31] S. S. Alwakeel, H. A. Altwaijry, and M. Ammad-uddin, “Class Based P- persistent Scheme for Smart Grid Load Balancing,” *2012 IEEE Electr. Power Energy Conf.*, pp. 196–201, 2012.
- [32] A. Raminfard, S. M. Shahrtash, T. Herizchi, and H. Khoshkhoo, “Long-Term Load Balancing Program in LV Distribution Networks,” vol. 1, no. June, pp. 6–7, 2012.
- [33] J. L. Montaña Cruz, “Implementación de una metodología para programar pacientes en el centro de hemodiálisis del Hospital General del Estado de Sonora HGES,” Universidad de Sonora, 2010.
- [34] D. A. De Sousa, “PROGRAMAÇÃO INTEIRA - MÉTODO BRANCH AND BOUND,” 2008.
- [35] J. Álvarez López, “Asignación Óptima de Generación con Restricciones de Transmisión en Mercados Mayoristas de Energía Eléctrica,” Instituto Tecnológico de Morelia, 2004.
- [36] H. Quang-Du, G. Yue, R. Gowdemy, and L.-N. Tho, *Wireless Communications Networks for the Smart Grid*. Springer, 2014.
- [37] Electro Industries, “Shark 100-S. Manual de Instalación y Operación,” 2010.
- [38] J. A. Chagüi Ahumada and L. A. Martínez Peralta, “RED ELÉCTRICA INTELIGENTE UNINORTE FASE II,” Universidad del Norte, 2013.